

Peter Erlhofer, Herbert Saurugg

# Le système européen d'approvisionnement en électricité en transition

Conséquences possibles d'une perturbation majeure européenne (« blackout »)

## Résumé

Le système européen d'approvisionnement en électricité subit une transformation fondamentale. De nombreuses étapes se déroulent en parallèle et semblent mal coordonnées et harmonisées. Cependant, un système est toujours plus que la somme de ses parties. En raison des nombreux changements et de leurs interdépendances, ces processus de changement augmentent également le risque de perturbations majeures voire d'une éventuelle panne de courant suprarégionale (« blackout »). Toutefois, la conséquence ne serait pas seulement une panne d'électricité à grande échelle. Cela déclencherait inévitablement des réactions en chaîne difficilement évaluables dans l'ensemble de la logistique d'approvisionnement, auxquelles ni les personnes, ni les entreprises, ni l'État et ses organes ne sont préparés. Cet article met en lumière les bouleversements profonds du système européen d'approvisionnement en électricité ainsi que les conséquences possibles d'un blackout.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Les enjeux actuels du système d'interconnexion européen</b>	<b>2</b>
1.1	Équilibre permanent	2
1.1.1	Réduction de la réserve instantanée critique pour le système	3
1.2	Des mises en œuvre systémiques insuffisantes	3
1.2.1	La libéralisation du marché	4
1.3	Commerce d'électricité	5
1.3.1	Principe de l'ordre du mérite	6
1.3.2	Absence d'accord sur l'électricité avec la Suisse	6
1.4	Des mises en œuvre systémiques insuffisantes	7
1.4.1	Des capacités de centrales électriques disponibles de manière fiable	7
1.4.2	Infrastructures de lignes insuffisantes	9
1.4.3	Des infrastructures vieillissantes	9
1.4.4	Des effets de résonance peu considérés	9
1.4.5	Augmentation des mesures de compensation	10
1.4.6	Manque de stockage et de tampons	11
1.4.7	Power-to-X	12
1.4.8	Ordres de grandeur	12
1.4.9	Fausses affirmations sur la décentralisation	13
1.4.10	Unités fonctionnelles décentralisées (« cellules énergétiques »)	14
1.4.11	Réduction de la demande d'énergie versus augmentation de la consommation d'électricité	14
1.4.12	Numérisation du système énergétique	15
1.4.13	Besoin en ressources	16
1.5	Autres domaines problématiques	17
1.5.1	Événements météorologiques extrêmes	17
1.5.2	Sabotage, terreur, cyberattaques	18
1.6	Évaluation des risques	18
1.6.1	Illusion de la dinde	19
1.6.2	Perturbations majeures comme signaux d'alarme possibles	19
1.7	Résumé	20

<b>2</b>	<b>Une panne d'électricité suprarégionale («blackout»)</b>	<b>21</b>
2.1	Définition du blackout	23
2.1.1	Situation de pénurie d'électricité	24
2.2	Conséquences et durée d'un blackout	25
2.2.1	Phase 1 - panne totale d'électricité et d'infrastructure	25
2.2.2	Phase 2	27
2.2.3	Phase 3	29
2.3	Que peut-on faire?	29
2.3.1	Mesures organisationnelles	30
2.4	Résumé	30
<b>3</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>32</b>
3.1	Auteurs	34

## **1 Les enjeux actuels du système d'interconnexion européen**

Le réseau de transport européen du groupe régional d'Europe centrale (ENTSO-E/RG CE) comprend 29 pays et s'étend du Portugal à l'est de la Turquie, de la Sicile au Danemark et, depuis mars 2022, également jusqu'à l'est de l'Ukraine. Il constitue une unité fonctionnelle qui ne peut fonctionner que dans son ensemble. Des perturbations dans ce système peuvent potentiellement se propager sur une grande zone, même si des mécanismes de sécurité appropriés sont censés l'empêcher. En outre, il existe une interconnexion avec les régions de réseau voisines. Le réseau européen des gestionnaires de réseau de transport (ENTSO-E) compte 39 membres issus de 35 pays<sup>1</sup>.

Le système d'approvisionnement en électricité européen est en train de subir des changements fondamentaux en raison de la transition énergétique. De nombreuses étapes se déroulent en parallèle et ne semblent pas être suffisamment coordonnées et harmonisées. Le présent article tente de mettre en évidence ces relations complexes et de les relier entre elles. Tout à fait dans l'esprit de » la compréhension des composantes du système résulte toujours de la connaissance de l'ensemble, et non l'inverse «. [Meadows et al. (1973) p. 168]

Même s'il s'agit déjà d'une réflexion assez complète, elle n'est pas exhaustive. Et comme souvent dans les environnements complexes, des contradictions et des conflits d'objectifs apparaissent mais il n'est pas possible de les aborder tous ici. Il s'agit avant tout de mettre en évidence les aspects et les interactions qui constituent une menace pour la sécurité du système et de l'approvisionnement, et donc pour la société dans son ensemble. Il s'agit également de mettre en évidence la fragilité croissante du système d'interconnexion européen. Les conséquences sous-estimées d'une éventuelle perturbation européenne majeure sous la forme d'un blackout sont traitées dans la deuxième partie.

### **1.1 Équilibre permanent**

Dans un système de courant alternatif, l'équilibre entre la production et la consommation doit être maintenu en permanence, pendant 31,5 millions de secondes par an, avec une tolérance relativement faible. Si cet équilibre ne peut pas être maintenu, le système risque de s'effondrer. Il s'agit donc d'un équilibre très délicat, dont nous n'avons souvent pas conscience.

Il est problématique que de nombreuses réflexions actuelles sur la transition énergétique ne considèrent et ne présentent souvent que des bilans annuels et des valeurs moyennes, ce qui est nettement insuffisant et dangereux pour la sécurité immédiate du système.

Cet équilibre était relativement facile à maintenir dans le système à grande échelle précédent, avec quelques milliers de grandes centrales facilement contrôlables. La consommation constamment fluctuante pouvait être compensée de manière satisfaisante. Cependant, avec la transition énergétique, le nombre de centrales de production volatiles et à peine contrôlables augmente considérablement, tandis que la disponibilité de centrales électriques contrôlables diminue. Au lieu de

<sup>1</sup> Cf. <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/members>. Consulté le 01.10.2023.

quelques milliers de centrales électriques, il existe désormais des millions d'installations, ce qui augmente en outre considérablement la complexité de l'ensemble du système et modifie son comportement [voir Erlhofer (2023), chapitre 6].

### 1.1.1 Réduction de la réserve instantanée critique pour le système

Jusqu'à présent, les générateurs synchrones des grandes centrales électriques produisant de l'électricité étaient un garant essentiel de la très grande stabilité du système dans le système interconnecté européen. Leurs masses en rotation (« réserve instantanée »)<sup>2</sup> constituent un réservoir d'énergie inhérent qui peut compenser les excédents ou les déficits d'énergie à court terme. Elles constituent en quelque sorte un « amortisseur de chocs ».

Les générateurs synchrones génèrent la fréquence du courant alternatif qui, à son tour, indique s'il y a un manque ou un excédent de puissance dans l'ensemble du système. La fréquence permet des interventions de régulation entièrement automatiques et purement physiques qui équilibrent en permanence l'ensemble du système et le maintiennent stable. C'est comme marcher sur une corde raide, où l'équilibre doit être constamment maintenu par des mesures d'équilibrage à peine visibles. Toute réaction brusque peut s'avérer dangereuse et entraîner une chute.

Avec le tournant énergétique et l'arrêt des centrales électriques conventionnelles qui en découle, on assiste également à une forte réduction de ces amortisseurs importants pour le système. Les installations photovoltaïques (PV) et éoliennes (WPP) ne disposent pas de cette fonction centrale du système. Dans le cas des éoliennes, il y a certes des éléments rotatifs mais pas de couplage direct car les éoliennes disposent d'un générateur de courant continu en raison des vitesses de vent variables. Le courant continu produit est converti par des onduleurs en aval avant d'être injecté dans le réseau de courant alternatif.

Il est certes envisagé d'utiliser les générateurs existants comme volant d'inertie mais cela nécessite souvent des mesures de transformation importantes et entraîne des coûts supplémentaires pour lesquels il n'existe pas encore de réglementation. Des solutions de remplacement avec de grandes batteries de stockage et de l'électronique de puissance doivent encore être mises en place à plus grande échelle. Mais elles ne pourront pas non plus, dans l'optique actuelle, remplacer entièrement les générateurs synchrones.

D'autre part, la répartition régionale de la réserve instantanée ainsi que la taille individuelle des installations respectives jouent également un rôle. Ainsi, dans le nord de l'Allemagne et au Danemark, il n'y a pratiquement pas de centrales conventionnelles et donc peu de réserve instantanée. En cas de panne de réseau défavorable entraînant une séparation en réseaux partiels ou une panne majeure, un effet domino de grande ampleur pourrait être déclenché. Un rétablissement du réseau devient également très problématique avec peu ou insuffisamment de réserve instantanée [voir Reichl et al. (2015)] car les pics de charge attendus ne peuvent être que difficilement compensés, ce qui peut à son tour entraîner des dommages considérables sur les infrastructures (informatiques) en cas d'importantes fluctuations de tension et de courant. D'autre part, la taille physique de chaque réserve instantanée a également un impact sur la tolérance aux pannes de l'ensemble du système [voir Qvist et al. (2023)].

Par conséquent, à l'avenir, de moins en moins d'installations contribueront à la stabilité du système. La fragilité et la sensibilité aux pannes du système interconnecté augmentent donc. D'un point de vue purement technique, il serait tout à fait possible d'obtenir bien plus que ce qui est visé et mis en œuvre aujourd'hui. Les raisons en sont multiples et vont du manque de compréhension globale du système à des considérations purement économiques.

## 1.2 Des mises en œuvre systémiques insuffisantes

En outre, il existe une série de thèmes individuels qui sont souvent considérés de manière isolée. Or, une transformation du système exige une mise en œuvre holistique, systémique et coordonnée des mesures nécessaires si l'on veut qu'elle soit couronnée de succès.

De nombreux chantiers isolés, sans évaluation suffisante des effets secondaires et des conséquences, constituent la base de projets avortés dont le nombre n'est pas négligeable notamment en Allemagne. La transformation de l'approvisionnement en énergie est toutefois d'un tout autre ordre de grandeur que la construction d'un grand aéroport ou l'entretien des infrastructures routières ou ferroviaires. Sans parler du fait que la transformation doit se faire en cours d'exploitation, ce que l'on compare volontiers à une chirurgie à cœur ouvert.

---

<sup>2</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/hintergrundthemen/#momentanreserve>. Consulté le 01.10.2023.

### 1.2.1 La libéralisation du marché

L'une des causes principales de nombreuses actions non systémiques et de la mauvaise compréhension du système est sans doute la libéralisation du marché (« dégroupage / unbundling ») au sein de l'UE. Dans ce contexte, la vision globale entretenue jusqu'alors sous la forme d'entreprises d'approvisionnement en énergie a été divisée en plusieurs secteurs : les exploitants de centrales électriques qui doivent désormais travailler dans un but lucratif, les réseaux qui sont réglementés en raison de leur position de monopole naturelle et le marché et la distribution de l'électricité qui fournissent formellement l'électricité aux clients. Le commerce et la distribution ne devraient plus avoir de rapport avec la réalité physique et l'infrastructure. Chaque secteur est donc appelé à veiller à sa propre optimisation. Bien que cela entraîne quelques gains d'efficacité, cela entraîne également de graves effets secondaires. En effet, si chacun ne prête attention ou doit prêter attention qu'à sa propre optimisation technique et financière, ce qui est commun se perd et les synergies et les possibilités de compensation autrement possibles doivent toujours être achetées au prix fort. Comme c'est souvent le cas, les effets secondaires n'apparaissent qu'avec un certain retard [voir Erlhofer (2023). chapitre 6].

La libéralisation du marché a été lancée il y a plus de 20 ans avec les meilleures intentions du monde: briser les anciens monopoles assez rigides des grandes entreprises de distribution d'énergie, faire baisser les prix et améliorer le service. Depuis, cela a plus ou moins réussi. Seul l'avenir nous dira si cela a été vraiment durable. Pour l'instant, il est légitime d'en douter, comme l'a montré l'explosion des prix de l'électricité au cours des dernières années. En peu de temps, une grande partie des économies réalisées auparavant pour les clients ont été annulées. Les causes n'étaient toutefois pas uniquement, comme on le prétend volontiers, la guerre en Ukraine et l'augmentation des prix du gaz mais une pénurie de ressources disponibles de manière fiable qui s'annonçait déjà avec les augmentations de prix à partir du printemps 2021.<sup>3</sup>

Au cours des 20 dernières années, une grande partie des excédents de capacité des centrales électriques ont été continuellement réduits dans le cadre de la libéralisation du marché. Les économies exigées par la réglementation dans l'exploitation du réseau ont eu pour conséquence qu'il n'y a plus guère de réserves disponibles dans ce domaine et que le renouvellement de l'infrastructure existante devient de plus en plus urgent, parallèlement à la poursuite nécessaire de l'extension.

Ces optimisations économiques ont en outre conduit à ce que de nombreux moyens d'exploitation tels que les centrales électriques ou les nouveaux accumulateurs à batterie, ont été optimisés en premier lieu pour obtenir un rendement maximal et ne peuvent donc plus se comporter en tant que tels en faveur du système.

A cela s'ajoute le fait que de plus en plus de prestataires de niche font leur apparition sur le marché et se chargent de certaines tâches lucratives. En principe, une certaine concurrence peut être un moteur d'innovation. Mais ce que l'on oublie souvent ici aussi c'est que cela crée d'autres problèmes et effets secondaires. Car si les acteurs actuels sont cannibalisés, la question se pose de savoir qui reprendra les domaines non rentables. Par exemple, il est possible de gagner beaucoup d'argent aujourd'hui et à l'avenir avec de grands systèmes de stockage sur batterie pour fournir de l'énergie d'équilibrage car des cycles élevés sont également nécessaires ici. Ainsi, les installations qui auparavant pouvaient non seulement fournir de l'énergie de réglage pour compenser les fluctuations de puissance imprévues mais également de l'énergie en continu pour assurer la charge de base, deviennent de moins en moins rentables et donc moins intéressantes. Ces deux systèmes sont absolument nécessaires pour pouvoir garantir à tout moment la sécurité du système. Il est donc prévisible que, sans une régulation compensatoire, la collectivité finira par supporter les coûts élevés de ces installations non rentables mais néanmoins nécessaires. Ces coûts sont volontiers dissimulés derrière les tarifs de réseau. Cela montre une fois de plus qu'une réflexion de type « ou bien, ou bien » ne contribue pas à résoudre les problèmes en suspens.

Au contraire, la coopération est une condition sine qua non pour un approvisionnement énergétique fonctionnel et abordable.

Une régulation simple mais probablement très efficace, pourrait consister à obliger les acteurs du marché d'une certaine taille à remplir certaines exigences de qualité, par exemple à pouvoir fournir de l'électricité de manière fiable pendant un nombre d'heures à définir par an (énergie en ruban ou charge de base), sous peine de devoir payer des compensations importantes.

Le tout peut tout à fait être couplé à un budget CO2 déterminé. Cela obligerait vraisemblablement à coopérer. La compensation financière serait probablement bien plus avantageuse qu'aujourd'hui, où la collectivité doit prendre en charge les mesures de compensation coûteuses.

<sup>3</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/blackout/risiko-eines-blackouts/aktuelle-situation/#strompreise>. Consulté le 01.10.2023.

### 1.3 Commerce d'électricité

Le commerce de l'électricité joue également un rôle de plus en plus crucial. Ainsi, en juin 2019, des négociants allemands en électricité ont mis le système d'approvisionnement en électricité dans une situation précaire en exploitant une lacune de la réglementation. Malgré les avertissements et les lourdes amendes qui menacent, les failles continuent d'être exploitées.<sup>4</sup> En 2020, on a observé 141, en 2021 : 248, en 2022 : 210 et en 2023 jusqu'en septembre 187 anomalies de fréquence importantes, notamment autour du changement d'heure,<sup>5</sup> qui sont principalement dues à une planification de l'utilisation des centrales optimisée du point de vue de la gestion d'entreprise.<sup>6</sup> Pour compenser ces écarts, on abuse régulièrement de la moitié voire des deux tiers de la réserve conservée pour les pannes imprévues des centrales. Bien qu'il soit techniquement possible de remédier à cette situation, la réglementation nécessaire n'a pas encore été mise en œuvre. Si des pannes de centrales supplémentaires devaient survenir pendant cette période, ce qui est tout à fait probable lors du changement d'horaire<sup>7</sup>, cela pourrait déclencher un grave effet domino.

A cela s'ajoute le fait que depuis l'automne 2021, les prix de l'électricité ont considérablement augmenté en Europe. Alors que le prix moyen d'un mégawattheure (MWh) d'électricité à la bourse de l'électricité était d'environ 35 euros entre 2015 et 2020, il est passé à 97 euros en 2021 et même à 237 euros par MWh en 2022 pour le marché allemand de l'électricité. Jusqu'en septembre 2023, le prix moyen était de 100 euros par MWh avec deux extrêmes : Le 2 juillet 2023, la valeur extrême de -500 euros par MWh a été atteinte pour la première fois. Cela signifie que les gros consommateurs ont obtenu 500 euros pour l'achat de l'électricité qu'ils devraient normalement payer environ 100 euros. Le 11 septembre, le record annuel de 524 euros par MWh a été atteint, alors que 30 heures auparavant, l'électricité était encore vendue à zéro euro.<sup>8</sup> Avec la poursuite du développement de la production volatile sans possibilité de stockage suffisante, des fluctuations aussi importantes au cours d'une journée voire sur plusieurs jours, seront de plus en plus fréquentes. Le problème fondamental est ici aussi l'optimisation des pièces détachées.<sup>9</sup> A cela s'ajoute le fait que les rendements élevés attendus dans ce contexte peuvent conduire à des spéculations supplémentaires.

Non seulement les coûts augmentent mais la stabilité du réseau est également menacée.

Dans le même temps, le commerce suprarégional de l'électricité doit être considérablement étendu d'ici 2025 en raison du règlement de l'UE sur le marché intérieur de l'électricité<sup>10</sup>. Pour ce faire, au moins 70 % de la capacité de transport techniquement possible aux points de connexion frontaliers doivent être mis à disposition pour le commerce d'électricité, ce qui représente une extension considérable par rapport à la pratique actuelle. Ces points d'interconnexion transfrontaliers n'ont jamais été conçus pour un échange et un transport d'électricité d'une telle ampleur mais ont simplement servi de niveau de repli.

Ce qui permet une utilisation plus efficace des moyens de production au quotidien risque de provoquer rapidement des coupures de courant à grande échelle en cas de panne. L'absence de sous-structures avec des réserves et des redondances augmente la fragilité du système [cf. Vester (2018) ; Taleb 2013 ; Dueck (2015)]. Voir également à ce sujet le paragraphe « Les grandes perturbations comme signaux d'alerte possibles plus loin ».

Le souhait de la politique et du commerce de l'électricité de créer une « plaque de cuivre européenne »<sup>11</sup> est compréhensible mais il est dépourvu de toute réalité et ignore les conditions physiques et les lois.

<sup>4</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/2020/blog/stromversorgung/gier-frisst-hirn-und-kann-in-die-katastrophe-fuehren>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>5</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/blackout/risiko-eines-blackouts/aktuelle-situation/#netzfrequenz>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>6</sup> Cf. <https://www.amprion.net/Netzjournal/Beitr%C3%A4ge-2021/Ph%C3%A4nomen-zur-vollen-Stunde.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>7</sup> Les transactions d'achat et de vente de quantités d'électricité qui résultent du commerce de l'électricité, tant à l'intérieur qu'au-delà des zones de régulation, sont réglées par des « programmes prévisionnels » qui doivent être annoncés aux GRT.

<sup>8</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/blackout/risiko-eines-blackouts/aktuelle-situation/#strompreise>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>9</sup> Cf. L'heure tourne : Pourquoi il est urgent de légiférer sur le stockage par batterie. <https://www.pv-magazine.de/2023/09/11/die-uhr-tickt-warum-es-dringend-eine-gesetzgebung-fuer-batteriespeicher-braucht>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>10</sup> Cf. règlement (UE) 2019/943 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 concernant le marché intérieur de l'électricité (28). <https://eurlex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0943&qid=1694768460571>. Zugriff am 01.10.2023.

<sup>11</sup> Un système électrique européen idéal, dans lequel l'électricité coûte partout le même prix et où il n'y a pas de goulets d'étranglement dans le transport, dans lequel les producteurs et les consommateurs d'électricité peuvent produire et consommer de l'électricité sans restriction, est comparé à une plaque de cuivre géante. Le design du marché dans le secteur de l'électricité est basé sur cette image. Cela entraîne un besoin important de mesures correctives permanentes (redispatching).

### 1.3.1 Principe de l'ordre du mérite

Le négoce d'électricité à la bourse de l'électricité s'effectue selon le principe dit du « merit order ». L'ordre d'intervention des centrales électriques sur une place de négoce est fixé de manière à obtenir le meilleur prix économique pour l'électricité. Les centrales qui peuvent produire de l'électricité à très bas prix sont mises en service en premier. Ensuite, les centrales dont les coûts marginaux sont plus élevés sont activées jusqu'à ce que la demande soit couverte. La dernière centrale requise détermine le prix pour toutes les installations de production qui sont entrées en jeu. L'ordre de mérite ne tient donc pas compte des coûts fixes ou systémiques mais uniquement des coûts de production purs.<sup>12</sup>

Au cours des 20 dernières années, ce principe a permis d'utiliser les centrales électriques de manière beaucoup plus efficace et de réduire systématiquement les surcapacités apparemment inutiles et réelles, ce qui a également entraîné une réduction des coûts. De plus, les installations de production renouvelables (ER), dont les coûts marginaux sont très faibles, font baisser le prix de l'électricité. Toutefois, il s'agit plutôt d'une dissimulation. Cela s'explique par le fait que les installations SER subventionnées reçoivent, dans le cadre du processus de répartition, une rémunération nettement plus élevée que celle qu'elles génèrent elles-mêmes. D'autre part, les mesures de compensation nécessaires en cas d'écarts par rapport au programme prévisionnel sont dissimulées dans les tarifs de réseau et répercutées sur tous les clients finaux.

En outre, ce modèle semble présenter d'importantes erreurs de conception qui se sont révélées particulièrement graves dans le cadre de la crise énergétique de 2022. Si les coûts marginaux de la dernière centrale électrique nécessaire augmentent massivement, par exemple en raison d'une forte hausse du prix du gaz, le prix total de l'électricité augmente massivement et tous les autres exploitants de centrales électriques qui opèrent avec des coûts de production nettement plus bas, réalisent d'énormes bénéfices aléatoires. C'est pourquoi ce modèle 2022 a été massivement critiqué et devrait être réformé, ce dont on n'a pas encore entendu parler. Il faut donc partir du principe que de telles aberrations restent possibles et qu'il faut s'y attendre.

Une autre erreur de conception devrait se traduire par une hausse des prix de l'électricité dès 2021. En effet, alors que ce modèle a permis de réaliser des gains d'efficacité considérables en période de surcapacités massives, il conduit désormais à une situation de pénurie dans laquelle les prix peuvent être artificiellement poussés à la hausse, alors que les capacités de production disponibles sont de moins en moins fiables et que la volatilité des énergies renouvelables est élevée [cf. Dueck (2015)]. Cela peut conduire à une situation extrême dans laquelle l'énergie non disponible ne peut plus être remplacée même à un prix élevé. En dernière conséquence, des coupures d'électricité à grande échelle seraient nécessaires pour éviter une pénurie qui mettrait en danger le système.

Se focaliser uniquement sur les coûts marginaux est donc nettement insuffisant et conduira vraisemblablement de plus en plus souvent à des aberrations extrêmes. Les perdants seront, comme souvent, les consommateurs qui, d'une manière ou d'une autre, devront toujours payer l'addition. Une fois de plus, il faut donc savoir que seul celui qui connaît et comprend l'ensemble comprend aussi les détails et non l'inverse [voir Meadows et al. (1973)].

A cela s'ajoute le fait que ce modèle de marché ne peut pas être modifié si facilement car il a atteint entre-temps une telle complexité que personne ne sait vraiment ce qui se passerait si l'on intervenait ici. On pourrait donc tout à fait conclure que la cruche doit aller au puits jusqu'à ce qu'elle se brise. On pourrait tout aussi bien parler ici d'un « système trop grand pour échouer ».

### 1.3.2 Absence d'accord sur l'électricité avec la Suisse

A cela s'ajoute également un différend politique entre la Suisse et l'UE.<sup>13</sup> En ce qui concerne l'extension du marché de l'électricité et l'augmentation des échanges internationaux d'électricité, il n'y a pas d'autre solution que de passer par la Suisse. Avec 41 points de couplage frontaliers, aucun autre pays ne dispose d'autant de liaisons de réseau électrique avec les pays voisins comme la Suisse. La Suisse joue ainsi un rôle central dans l'échange d'électricité en Europe centrale. En l'absence d'un accord global entre l'UE et la Suisse, un accord séparé sur l'électricité est également rejeté.

Cela signifie que la Suisse devrait à l'avenir être exclue des comités et de l'échange d'informations dans le commerce de l'électricité. Dans le même temps, le gestionnaire du réseau de transport suisse Swissgrid devrait alors compenser les flux de

<sup>12</sup> Voir Qu'est-ce que l'ordre du mérite ? <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/merit-order>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>13</sup> Cf. défaite au tribunal pour Swissgrid. <https://www.srf.ch/audio/info-3/niederlage-vor-gericht-fuer-swissgrid?id=12441910>. Consulté le 01.10.2023.

charge via la Suisse qui pourraient survenir de manière inattendue en raison du commerce international de l'électricité.<sup>14</sup> Cela a déjà conduit à une situation critique en 2019.<sup>15</sup> Comme le flux d'électricité suit des lois purement physiques et prend le chemin de la moindre résistance, indépendamment de la personne entre laquelle l'électricité a été négociée auparavant, des flux de charge imprévus considérables peuvent survenir via la Suisse. C'est un facteur supplémentaire qui augmente le risque d'une perturbation majeure à l'échelle européenne.<sup>16</sup>

## 1.4 Des mises en œuvre systémiques insuffisantes

Des mises en œuvre systémiques insuffisantes peuvent également être observées dans de nombreux autres domaines. Ce ne sont pas les connaissances ou les techniques nécessaires qui font défaut mais la compréhension et la mise en œuvre concrète. Les conflits d'objectifs entre les différents acteurs jouent probablement aussi un rôle.

Les problèmes sont complexes et partent souvent par le fait que l'installation d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques ne suffit pas même si c'est la priorité absolue dans de nombreux pays. Pour réussir la transition énergétique il faut adapter et développer l'ensemble de l'infrastructure, ce qui n'a pas été suffisamment thématiqué, ignoré ou reporté jusqu'à présent.<sup>17 18</sup>

### 1.4.1 Des capacités de centrales électriques disponibles de manière fiable

Ces dernières années, l'Allemagne en particulier a tout mis en œuvre pour sortir le plus rapidement possible du charbon et de l'énergie nucléaire. Ce faisant, elle a accordé peu d'attention à la mise en œuvre des mesures de remplacement nécessaires. Alors que l'abandon de l'énergie nucléaire a été réalisé entre-temps, il faut maintenant faire un retour en arrière et réintroduire le charbon. Sans les masses tournantes et les centrales de remplacement rapides, comme les centrales à gaz, la sortie du charbon ne sera pas non plus couronnée de succès.

Les accumulateurs à grande capacité pourraient certes prendre le relais mais ils ne remplacent pas les installations capables de prendre le relais pour plus de quelques heures. En Allemagne, plusieurs grands systèmes de stockage par batteries sont certes actuellement en cours de planification, de construction ou partiellement achevés. Selon le point de vue, il faudrait ajouter en Allemagne entre 23 et 43 GW de puissance provenant de centrales à gaz d'ici 2030.<sup>19</sup> Cela constituerait déjà à lui seul un énorme défi. La guerre en Ukraine et l'interruption des livraisons de gaz en provenance de Russie remettent toutefois ces projets en question. Sans compter que des projets d'infrastructure de cette ampleur ne peuvent pas être réalisés du jour au lendemain, tout retard et l'absence d'une solution de remplacement adéquate devraient toutefois remettre en cause toutes les autres planifications, ce qui n'est guère le cas jusqu'à présent. On s'en tient obstinément à des objectifs unilatéraux sans les adapter aux conditions générales en constante évolution.

Même l'expansion annoncée du nucléaire en France n'est pour l'instant qu'une déclaration d'intention<sup>20</sup> qui a déjà changé à plusieurs reprises ces dernières années. L'âge moyen des centrales nucléaires françaises est de 36 ans.<sup>21</sup> Avec une période de construction actuelle de 10 à 15 ans, il ne s'agit donc pas d'extension mais uniquement de remplacement des anciennes centrales qui doivent déjà être de plus en plus souvent retirées du réseau pour des raisons de sécurité.

<sup>14</sup> Cf. accord sur l'électricité entre l'UE et la Suisse. <https://www.saurugg.net/2019/blog/stromversorgung/stromabkommen-eu-schweiz>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>15</sup> Cf. violation de la sécurité du réseau du 20 mai 2019. <https://www.swissgrid.ch/de/home/newsroom/newsfeed/20190524-02.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>16</sup> Cf. non planifié dans le réseau électrique - un risque pour la Suisse. <https://www.swissgrid.ch/de/home/newsroom/blog/2023/ungeplantes-im-reseau-elektrisch.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>17</sup> Cf. l'exploitant de réseau Amprion met en garde : une sortie rapide du charbon pèse sur la sécurité d'approvisionnement. <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/energiewende-netzbetreiber-amprion-warnt-rascher-kohleausstieg-belastet-die-versorgungssicherheit/27867444.html>. Consulté le 01.10.2023 ; ou SuedLink : Le tunnel sous l'Elbe pour l'autoroute de l'électricité <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/SuedLink-Der-Elbtunnel-fuer-die-Stromautobahn,suedlink298.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>18</sup> Cf. le chef d'Eon met en garde contre les coupures de courant contrôlées. <https://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/517630/Eon-Chef-warnt-vor-kontrollierten-Stromabschaltungen>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>19</sup> Cf. sans centrales à gaz, pas de sortie du charbon ? <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/deutschland-braucht-neue-gaskraftwerke-101.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>20</sup> Cf. Macron veut construire jusqu'à 14 nouveaux réacteurs. <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/macron-atomkraftwerke-frankreich-100.html>. Consulté le 01.10.2023

<sup>21</sup> Cf. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/181801/umfrage/durchschnittsalter-von-atomreaktoren-in-ausgewaehlten-laendern-weltweit>. Consulté le 01.10.2023.

L'expansion des installations de production d'énergie renouvelable a également tendance à être fortement retardée même si l'on observe ici un net renversement de tendance dans le domaine des installations photovoltaïques d'ici 2023. Mais si les installations photovoltaïques peuvent être installées relativement rapidement, l'infrastructure de réseau et de stockage nécessaire tombe souvent en panne.<sup>22</sup> De plus en plus de projets ne peuvent plus être connectés au réseau. La surproduction doit être stoppée de plus en plus fréquemment pour éviter une surcharge du réseau.<sup>23</sup> Tout cela entraîne des coûts toujours plus élevés qui doivent être supportés par les consommateurs finaux à travers les différents systèmes de prélèvements.

En outre, l'Allemagne distribue de plus en plus d'électricité excédentaire à bas prix à l'étranger ou paie même l'achat et doit racheter l'électricité manquante à d'autres moments. Il s'agit non seulement d'une évolution désastreuse d'un point de vue économique mais cela entraîne également une charge croissante sur les infrastructures. De telles évolutions peuvent désormais être observées dans de plus en plus de pays notamment aux Pays-Bas, en Belgique et en Espagne.<sup>24</sup>

Il est également souligné depuis des années que sans nouvelles subventions, de nombreuses éoliennes allemandes ne peuvent plus être exploitées de manière économique ou doivent être démantelées en raison de l'expiration de leur autorisation d'exploitation temporaire. Le repowering, en revanche n'est ni judicieux ni possible sur tous les sites.<sup>25</sup> À cela s'ajoute la hausse des coûts des matières premières qui rend le développement de l'énergie éolienne, gourmand en ressources, de moins en moins rentable. Cela est particulièrement vrai dans le secteur offshore.<sup>26</sup>

C'est pourquoi des mesures de remplacement ont déjà été initiées : les centrales électriques au charbon destinées à être démantelées sont réactivées et remises en service<sup>27</sup>, ce qui contredit en fait l'objectif primordial de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Certaines centrales électriques au charbon ont été transférées vers la réserve du réseau afin de pouvoir augmenter encore leur puissance en cas de goulots d'étranglement prévisibles à long terme. Toutefois, ceux-ci ne peuvent pas être utilisés en cas d'événements ou de perturbations de courte durée. De plus, ces coûts sont à nouveau « cachés » dans les tarifs du réseau et répercutés sur tous les clients.

On peut douter qu'il ait été prévoyant de fermer les centrales nucléaires allemandes avant qu'un remplacement adéquat ne soit disponible. Malgré les énormes dépenses consenties pour la transition énergétique, l'Allemagne reste l'un des plus gros émetteurs de CO<sub>2</sub> en Europe pour la production d'électricité. De plus, les importations allemandes d'électricité ont nettement augmenté. A la fin de l'été 2023, on argumente encore sur le fait qu'il est moins cher et plus écologique d'importer de l'électricité que de la produire dans ses propres centrales à gaz ou à charbon. Il reste à voir si cela vaut également pour les mois d'hiver, d'autant plus que de nombreux pays voisins ont déjà importé de grandes quantités d'électricité d'Allemagne pendant le semestre d'hiver<sup>28</sup>, à commencer par l'Autriche.

De plus en plus de pays souhaitent à l'avenir importer de l'électricité des régions voisines plutôt que de la produire eux-mêmes.

Tant que les régions voisines disposent encore de capacités de production suffisantes, cette solution est judicieuse d'un point de vue économique. Cependant, elle surcharge le réseau européen dans son ensemble et en particulier les points de connexion frontaliers. Mais dans les pays voisins aussi, avec le passage aux installations photovoltaïques et éoliennes, il y a de plus en plus de périodes où il y a trop d'électricité et d'autres périodes où il n'y en a pas assez, généralement avec des schémas très similaires. Il est également faux de croire qu'il y a toujours du vent quelque part.<sup>29</sup> Ce problème va encore s'accroître avec l'augmentation des situations météorologiques extrêmes [voir ACPP (2014)].

---

<sup>22</sup> Cf. Die Uhr tickt: Warum es dringend eine Gesetzgebung für Batteriespeicher braucht. <https://www.pv-magazine.de/2023/09/11/die-uhr-tickt-warum-es-dringend-eine-gesetzgebung-fuer-batteriespeicher-braucht>. Zugriff am 01.10.2023.

<sup>23</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/blackout/risiko-eines-blackouts/aktuelle-situation/#kurzmeldungen>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>24</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/blackout/risiko-eines-blackouts/aktuelle-situation/#redispach>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>25</sup> Cf. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/windkraft-abbau-windraeder-foerderung-ausgelaufen-eeg-101.html>. Consulté le 01.10.2023

<sup>26</sup> Cf. L'échec de la vente aux enchères de l'énergie éolienne au Royaume-Uni aggrave les problèmes de l'industrie offshore. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-09-08/uk-fails-to-clear-any-offshore-wind-in-renewable-energy-auction>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>27</sup> Cf. L'Allemagne examine le retour de 1,9 GW de lignite pour l'hiver 2023-24. <https://www.argusmedia.com/en/news/2479617-germany-examines-19gw-lignite-winter-202324-return>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>28</sup> Cf. tout le monde veut importer, mais personne ne dit d'où viendra vraiment l'électricité... <https://www.saurugg.net/2019/blog/stromversorgung/alle-wollen-importieren-nur-niemand-sagt-woher-der-strom-dann-wirklich-kommen-soll>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>29</sup> Cf. Le mythe du foisonnement éolien en Europe. <https://participons.debatpublic.fr/uploads/decidim/attachment/file/425/Contribution2-MichelGay.pdf>. Consulté le 01.10.2023.

### 1.4.2 Infrastructures de lignes insuffisantes

Des défis considérables se posent également dans le domaine de l'infrastructure des lignes car la toute nouvelle structure de production modifie les exigences posées aux réseaux dans des dimensions inconnues jusqu'ici. Traditionnellement, la production et la consommation étaient étroitement liées dans l'espace et reliées par un réseau hiérarchique à sens unique. Aujourd'hui, les parcs éoliens sont principalement éloignés des centres de consommation. Cela rend nécessaire des mesures d'expansion à grande échelle au niveau du réseau de transport. Il en va autrement pour une grande partie des installations photovoltaïques existantes. Celles-ci sont localisées au niveau local. Cependant, ils alimentent les niveaux inférieurs du réseau dans le cadre du » trafic inverse « et provoquent des surcharges de plus en plus fréquentes. Les réseaux de distribution<sup>30</sup> ne sont pas conçus pour une telle évolution<sup>31</sup>.

La situation est d'autant plus difficile qu'une grande partie des réseaux de distribution en Europe centrale ont été enterrés au cours des dernières décennies pour réduire les pannes liées aux intempéries. Une mise à niveau et un rééquipement nécessitent donc un effort important, tout en étant confrontés à un manque de personnel et de ressources (voir également la section Ressources nécessaires ci-dessous).

En outre, l'expansion des lignes aériennes constitue un problème majeur dans presque tous les pays car elle se heurte souvent à une grande résistance de la part de la population (phénomène NIMBY - pas dans mon jardin).<sup>32</sup> Par exemple, le plan initial était d'achever les connexions nord-sud de l'Allemagne qui doivent transporter l'énergie éolienne du nord de l'Allemagne, dans la mesure où elle est disponible, vers les zones de consommation du sud de l'Allemagne d'ici fin 2022 lorsque l'énergie nucléaire sera progressivement éliminé. Dans la perspective actuelle, l'achèvement de la première ligne principale (» Suedlink «<sup>33</sup>) peut être attendu au plus tôt à partir de 2028.<sup>34</sup> La sortie du nucléaire allemand a été achevée le 15 avril 2023. Jusqu'à présent elle s'est déroulée sans problème et sans aucun impact sur l'approvisionnement. Reste à savoir si ce sera également le cas à l'avenir.

### 1.4.3 Des infrastructures vieillissantes

Le fait que de nombreuses infrastructures arrivent en fin de vie et d'utilisation pose un problème supplémentaire. (» Aging Infrastructures «). De nombreuses centrales électriques et infrastructures ont aujourd'hui entre 40 et 50 ans, certaines même nettement plus vieilles. Cela signifie que d'importants renouvellements devraient être effectués dans les années à venir afin de maintenir le parc existant. Cependant, cela n'est souvent pas réalisable économiquement dans le contexte économique actuel et dans des conditions-cadres incertaines. Les investissements ont donc été reportés de plusieurs années, ce qui risque d'accroître la vulnérabilité à l'échec. Si les investissements ne sont réalisés que lorsqu'ils sont rentables ou lorsque les dommages consécutifs sont déjà évidents, il est trop tard. Dans le même temps, de nombreuses réserves encore disponibles ont été utilisées ces dernières années au profit de l'optimisation de la gestion des entreprises. D'ailleurs, cela n'est pas seulement vrai dans le secteur de l'énergie mais en général.

Rien qu'en Allemagne, il existerait plus de 1 150 grands transformateurs dont environ 500 auraient déjà plus de 60 ans. En raison des charges d'exploitation croissantes et des processus de vieillissement irréversibles, ceux-ci atteindront probablement la fin de leur durée de vie utile. Il faudra donc les remplacer à moyen terme.

Or, la capacité de production allemande de telles usines est actuellement de 2 à 4 unités par an. En outre, la conversion du système et la numérisation nécessaire nécessiteront de nombreuses installations supplémentaires et nouvelles.

### 1.4.4 Des effets de résonance peu considérés

Les éventuels effets de résonance et les interactions de réseau entre les onduleurs et les composants électroniques constituent un phénomène peu pris en compte jusqu'à présent. Ils entraînent de plus en plus de perturbations, de fonctionnement du réseau et de l'installation, à peine connues jusqu'à présent, et peuvent même, dans des cas extrêmes, entraîner la des-

<sup>30</sup> Cf. aperçu des feux de signalisation du réseau. <https://www.netzampel.energy/home>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>31</sup> Cf. photovoltaïque : au moins 200 exploitants injectent plus d'électricité que ce qui est autorisé. <https://www.nachrichten.at/wirtschaft/photovoltaik-mindestens-200-exploitanten-alimentent-plus-de-courant-que-permis;art15,3880099>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>32</sup> Cf. <https://www.sn.at/salzburg/chronik/380-kv-urteil-entfacht-neuen-widerstand-67580512>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>33</sup> <https://suedlink.com>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>34</sup> Cf. <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/stromversorgung-betreiber-transnet-stromautobahn-suedlink-erst-ende-2028-fertig/28033178.html>. Consulté le 01.10.2023.

truction de moyens d'exploitation. Ces effets ne sont guère détectés par les méthodes actuelles et les observations de pièces individuelles.<sup>35</sup>

Si les observations faites jusqu'à présent se confirment, à savoir que les composants électroniques et les isolations des lignes électriques vieillissent plus rapidement, cela pourrait également entraîner des perturbations importantes dans le domaine des infrastructures dans un avenir proche. Les experts soulignent que les onduleurs installés aujourd'hui devraient être remplacés dans les plus brefs délais par une nouvelle génération afin de limiter d'éventuels dommages.<sup>36</sup>

Un autre phénomène est la prise de décision défensive [cf. Dueck (2015)]. Les décideurs ont tendance à ne pas choisir de faire des choses qui ne sont pas courantes, afin d'éviter le risque personnel d'un éventuel échec. Dans ce contexte, même un risque supposé faible pour le décideur lui-même influence sa perception. C'est pourquoi ils ne veulent souvent pas savoir exactement ce qui se passe dans leurs systèmes. Parce que s'ils le savaient, ils devraient agir, ce qui implique généralement des investissements. Tant que tout le monde le fait de cette façon, ils peuvent toujours s'en dissuader en disant que tout le monde l'a fait de cette façon. Une intervention réglementaire sera probablement nécessaire ici pour changer cette attitude.

Une optimisation commerciale unilatérale à court terme nous aveugle donc aux évolutions futures et ouvre la voie à des surprises stratégiques. L'histoire regorge de tels exemples de » destruction créatrice «.<sup>37</sup> Nokia ou Kodak en sont probablement les exemples les plus connus. Ce qui peut encore être acceptable pour l'économie en général ne l'est en aucun cas pour notre infrastructure vitale d'approvisionnement en électricité. Un échec aurait des conséquences dévastatrices pour la société dans son ensemble.

#### 1.4.5 Augmentation des mesures de compensation

Tous ces facteurs et d'autres aspects entraînent une augmentation rapide des coûts et des dépenses liés aux mesures de compensation. La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables est, par nature, soumise à des fluctuations et à des écarts de prévision constants et importants. Même si les modèles de prévision météorologique s'améliorent, il y a toujours des écarts significatifs qui doivent être compensés à court terme par d'autres centrales dans le cadre de mesures dites de redispatching.<sup>38</sup> Ces mesures de remplacement sont généralement coûteuses et sont facturées à la collectivité via des redevances de réseau.

Depuis des années, les dépenses dans le système interconnecté européen pour maintenir la stabilité du système augmentent. Les coûts autrichiens de gestion des congestions, c'est-à-dire les dépenses destinées à maintenir la stabilité du réseau et donc à éviter une panne d'électricité, ont augmenté de manière presque exponentielle passant de 1,1 million d'euros en 2012 à 736 millions d'euros en 2022. Au lieu de deux interventions, il a fallu en quelques années plus de 300 interventions par an. Même si ces dépenses ont considérablement diminué en raison de la séparation des marchés de l'électricité entre l'Allemagne et l'Autriche en octobre 2018, 2019 et 2020, elles ont à nouveau explosé depuis 2021 en partie à cause de la hausse des prix de l'électricité.<sup>39</sup> En Allemagne aussi, les interventions ont augmenté de manière significative, passant de 3 427 en 2014 à 12 392 en 2022 et 9 780 jusqu'en août 2023.<sup>40</sup>

La fréquence de 50 hertz dans le réseau européen doit à tout prix être maintenue dans la plage autorisée entre 50,2 Hz et 49,8 Hz. La production et la charge doivent toujours être équilibrées. A partir d'une sur fréquence de 51,5 Hz, les installations sont complètement déconnectées du réseau. A partir d'une fréquence de 47,5 Hz, toutes les centrales sont déconnectées du réseau électrique et l'alimentation en électricité doit être rétablie par la suite. Les causes des fluctuations croissantes qui doivent être compensées à grands frais, résident principalement dans le manque d'adaptation du système à des conditions générales fortement modifiées, par exemple en raison de l'adaptation insuffisante d'une infrastructure de lignes qui s'est

<sup>35</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/2020/blog/stromversorgung/versorgungssicherheit-strom-bedenkliche-ereignisse-2020>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>36</sup> Cf. <http://www.fette-competence-in-energy.com>. Consulté le 01.10.2023.

Cf. [https://cdnmedia.euofins.com/european-west/media/1663280/swissengineering\\_de.pdf](https://cdnmedia.euofins.com/european-west/media/1663280/swissengineering_de.pdf). Consulté le 01.10.2023.

Cf. <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/bb9783ec-d4c1-460f-98e0-b3f2bd475fd0/download>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>37</sup> La destruction créatrice (ou destruction créative) est un terme utilisé en macroéconomie, dont le message principal est le suivant : tout développement économique repose sur le processus de destruction créatrice. Grâce à une nouvelle combinaison de facteurs de production qui s'impose avec succès, les anciennes structures sont évincées et finalement détruites. La destruction est donc nécessaire - et non pas une erreur du système, pour que la réorganisation puisse avoir lieu. [https://de.wikipedia.org/wiki/Sch%C3%B6pferische\\_Zerst%C3%B6rung](https://de.wikipedia.org/wiki/Sch%C3%B6pferische_Zerst%C3%B6rung). Consulté le 01.10.2023.

<sup>38</sup> Cf. <https://www.apg.at/de/Energiezukunft/Redispatch>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>39</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/blackout/risiko-eines-blackouts/aktuelle-situation/#epm>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>40</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/blackout/risiko-eines-blackouts/aktuelle-situation/#redispatch>. Consulté le 01.10.2023.

développée sur une longue période et du manque de stockage. En cours de fonctionnement, d'innombrables nouveaux producteurs doivent être intégrés et de nouveaux consommateurs raccordés et alimentés.

#### 1.4.6 Manque de stockage et de tampons

Un autre élément central de la future infrastructure électrique et une partie des problèmes actuels sont les systèmes de stockage et de tampon (p. ex. les électrolyseurs sur les côtes), afin de pouvoir d'une part traiter les excédents et d'autre part compenser à tout moment la production volatile issue des énergies renouvelables et remplacer par conséquent les centrales électriques conventionnelles. Il ne s'agit pas seulement de la réserve momentanée décrite mais d'une très large plage de temps : de l'inhérent au stockage saisonnier en passant par les secondes, les minutes, les heures, les jours et les semaines.<sup>41</sup> Cette étendue des stockages et des technologies nécessaires est certes constamment discutée, en particulier par les politiciens mais elle est encore loin d'être mise en œuvre au-delà des projets pilotes.

En Europe, il y a toujours des fenêtres de temps allant jusqu'à deux semaines, pendant lesquelles il n'y a presque pas de vent, ni de soleil. (« période creuse »). Ces périodes doivent également être maîtrisées dans un système décarbonisé, même si elles sont très rares. Cela nécessiterait toutefois une infrastructure d'ombre presque complète car il n'existe pas encore de solutions correspondantes pour cela, ni dans un avenir prévisible [voir Palmer et al. (2020)].

Cependant, cela nécessiterait une infrastructure fantôme presque complète car il n'y a pas eu de solutions appropriées pour cela jusqu'à présent et il n'y en aura pas non plus dans un avenir prévisible [voir Palmer et al. (2020)]. Alternativement, des coupures d'électricité planifiées et limitées dans l'espace grâce à la gestion des pénuries d'électricité (appelées baisses de tension) seraient également envisageables à condition qu'il y ait un consensus social correspondant. [voir Paulitz (2020)].

Toutefois, cela causerait probablement des dégâts considérables au moins jusqu'à ce que cette procédure soit établie. Il s'agit donc d'une voie que pratiquement personne n'envisage sérieusement à l'heure actuelle. Mais faire l'autruche n'a jamais fonctionné non plus. Cependant, il y a toujours des jours où pratiquement aucune électricité ne peut être produite à partir de centrales photovoltaïques et éoliennes. Jusqu'à présent, ces lacunes pouvaient être comblées par les centrales électriques conventionnelles encore disponibles. Mais au fur et à mesure de leurs démantèlements successifs les capacités de réserve disponibles deviennent de plus en plus réduites.

Alors que l'Autriche dispose au moins théoriquement d'environ 3 300 GWh et la Suisse d'environ 8 900 GWh de capacité de stockage (pompée), l'Allemagne dans son ensemble ne dispose que d'environ 40 GWh, même si 300 GWh de la capacité autrichienne appartiennent à des entreprises allemandes. En Allemagne, il n'existe pas de projets ni d'opportunités d'expansion significatives. De plus, les projets potentiels échouent souvent en raison de la résistance des citoyens.<sup>42</sup> Une installation de stockage à grande échelle est actuellement prévue en Autriche qui sera directement connectée au réseau électrique allemand. Achèvement prévu : 2037<sup>43</sup>

Avec les capacités de stockage actuelles, l'Allemagne ne pourrait même pas couvrir une heure de sa propre consommation d'électricité (entre 60 et 80 GW). En outre, les centrales à accumulation (par pompage) ne disposent en outre que d'environ 11 GW de capacité goulet d'étranglement, c'est-à-dire qu'elles peuvent être sollicitées en même temps. Dans toute l'Europe, environ 103 GW de capacité de stockage pur sont disponibles, dont 47 GW de capacité de stockage par pompage.<sup>44</sup>

Les batteries des véhicules électriques ou les accumulateurs domestiques sont donc souvent cités comme solutions complémentaires. Celles-ci peuvent certainement apporter une contribution. Mais les ordres de grandeur à prendre en compte sont souvent totalement mal évalués.

Si l'on voulait stocker temporairement cette quantité d'énergie dans des batteries moyennes de véhicules électriques (75 kWh), il faudrait environ 240.000 véhicules qui devraient être entièrement rechargés en une journée à partir de l'état complètement déchargé. Si le vent ne souffle plus le lendemain, comme c'est souvent le cas, il faudrait environ 80 000 véhicules électriques pour alimenter le seul Burgenland qui devraient alors être entièrement déchargés. Si l'on voulait utiliser des ac-

<sup>41</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/energiezellensystem/die-zeit-in-der-elektrischen-energievorsorgung>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>42</sup> Cf. <https://www.suedkurier.de/region/hochrhein/herrischried/einen-gedenkstein-fuer-das-pumpspeicherwerk-atdorf-hat-die-bi-atdorf-gesetzt;art372599,10939259>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>43</sup> Cf. les phares de la transition énergétique : L'accumulateur de pompage le plus puissant d'Autriche.

<https://oesterreichsenergie.at/aktuelles/neuigkeiten/detailseite/leuchttuerme-der-energiewende-oesterreichs-staerkster-pumpspeicher>. Consulté le 01.10.2023

<sup>44</sup> Cf. [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Events/Eninnov2016/files/kf/Session\\_A1/KF\\_Benigni.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/kf/Session_A1/KF_Benigni.pdf). Consulté le 01.10.2023.

cumulateurs domestiques, il faudrait 7,5 fois la capacité actuelle d'environ 10 kWh. Un calcul purement mathématique car dans la réalité, on ne peut pas décharger complètement de tels accumulateurs et l'infrastructure technique ne le permettrait pas. Et les propriétaires des accumulateurs non plus.

Dans le cadre de la transition énergétique actuelle, on a négligé le fait que les centrales électriques conventionnelles ont d'une part intégré les accumulateurs dans l'énergie primaire (barres de combustible nucléaire, gaz, charbon, pétrole) et d'autre part qu'elles soutiennent le maintien de la fréquence de manière équilibrée grâce aux masses d'inertie existantes. A l'avenir, nous aurons une consommation croissante et de plus en plus difficile à prévoir, ainsi qu'une production d'électricité de plus en plus volatile. Il sera impossible de concilier ces deux aspects sans adapter le système en conséquence.

### 1.4.7 Power-to-X

Pour le stockage saisonnier, le » Power-to-X « est désormais considéré comme un grand espoir en particulier l'utilisation de l'hydrogène (H<sub>2</sub>). Cela semble également très séduisant car l'infrastructure gazière existante permettrait déjà de disposer d'une infrastructure utilisable à cet effet. Mais on omet volontiers de dire que des obstacles considérables doivent encore être surmontés. Cela commence par les mesures d'adaptation de l'infrastructure nécessaires (étanchéité des tuyaux), la construction d'électrolyseurs performants et l'absence d'énergie excédentaire, pourtant indispensable et disponible en permanence, afin de pouvoir produire l'hydrogène à des coûts et en quantités acceptables. De même, les idées d'importation sont actuellement plus un espoir qu'une solution à portée de main.

En outre, le stockage et le transport nécessitent un volume trois fois supérieur à celui du gaz naturel.<sup>45</sup> Parallèlement, le stockage et la production d'électricité qui s'ensuit s'accompagnent de pertes de conversion élevées, ce qui signifie qu'il faut au moins 3 à 4 fois plus d'énergie pour obtenir le même résultat. En outre, l'hydrogène sera à l'avenir nécessaire dans de nombreux processus industriels à grande échelle afin de pouvoir réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

Il en résulte une situation de concurrence importante qui se répercutera probablement sur la disponibilité et le prix.

Le rapport coûts-bénéfices est encore plus défavorable pour la production d'e-fuels (Power to Liquid, Power-to-Fuel, PtF, P2F), présentée comme la » solution en or « du transport individuel [voir Erlhofer (2023). p. 417 et suivantes]. Les e-fuels ont un mauvais rendement. La même quantité d'électricité permet de charger les batteries de 1 000 véhicules. En raison de la perte d'énergie lors de la conversion du courant électrique seules 375 voitures à hydrogène pourraient rouler. Avec du carburant synthétique, elles ne seraient que 156.

La perspective d'une grande vague d'extraction a déclenché une atmosphère de ruée vers l'or où les annonces prometteuses se succèdent. Il faut s'attendre à ce que l'une ou l'autre » pépite d'or « soit trouvée. Il ne faut toutefois pas s'attendre à ce que cela conduise à court terme à une grande percée et à une mise en œuvre à grande échelle. Or, des solutions rapidement applicables sont nécessaires dans un avenir proche et non pas dans 10 ou 20 ans.

D'autre part, on discute peu des éventuels » effets secondaires « tels que le dégagement de vapeur d'eau ayant un impact sur le climat lors de la réinjection d'électricité à grande échelle. Il en va de même pour les effets secondaires de la méthanisation prévue. Ici, les effets sont déjà connus : le méthane est nettement plus nocif pour le climat que le CO<sub>2</sub>. Cette question concerne également les installations de biogaz.

### 1.4.8 Ordres de grandeur

Dans de nombreuses discussions quotidiennes, il apparaît en outre que très peu de personnes et souvent aussi de nombreux spécialistes, n'ont aucune idée des ordres de grandeur de notre consommation d'énergie. Un simple exemple de calcul permet d'illustrer ce point.

Un million de secondes (comparable à un mégawattheure (MWh)) représente environ 12 jours. Un milliard de secondes (~ GWh) représente déjà près de 32 ans. Pour le stockage de l'électricité, nous parlons toutefois de TWh, soit environ 32 000 jours.

Ce qui peut bien fonctionner à la petite échelle d'une start-up, d'un projet pilote ou d'un projet de recherche, ne dit pas encore à quelle vitesse et si une mise à l'échelle est possible. D'autre part, la faisabilité financière et la rentabilité doivent également être au rendez-vous ce qui n'est guère le cas aujourd'hui. S'il s'agit de compenser une énergie de très haute qualité sous forme de sources d'énergie fossiles qui était en outre disponible jusqu'à présent à des prix relativement bas, on se

<sup>45</sup> Cf. l'hydrogène renouvelable en Autriche: [https://www.joanneum.at/fileadmin/user\\_upload/H2\\_Broschuere\\_final\\_2009.pdf](https://www.joanneum.at/fileadmin/user_upload/H2_Broschuere_final_2009.pdf). Consulté le 01.10.2023.

heurt rapidement à des limites difficilement surmontables même si le soleil et le vent n'envoient pas de facture, ce qui n'est qu'une petite partie de la vérité.

On compare donc volontiers des pommes et des poires ou on utilise des valeurs moyennes qui ne sont guère pertinentes pour la sécurité du système. Ainsi, 143 gigawatts (GW) de puissance éolienne et photovoltaïque installée en Allemagne pour une consommation simultanée de 60 à 80 GW, cela semble beaucoup. Mais si l'on sait que jusqu'à présent, seuls quelques jours par an ont permis de produire une puissance réelle de plus de 60 GW, la situation est tout de suite différente. La situation est encore plus sombre si l'on exclut certaines valeurs aberrantes comme le 16 novembre 2021. Ce jour-là, la production des installations éoliennes et photovoltaïques n'a été que de 0,23 GW au minimum. Sur l'ensemble de la journée, sur une consommation de 1,46 térawattheures (TWh), à peine 0,05 TWh a été produit par le vent et le soleil. Si l'on ajoute à cela le biogaz et l'énergie hydraulique, on obtient un total de 0,24 TWh.

Le 10 septembre 2023, 68 GW de puissance éolienne installée ont produit au minimum 0,1 GW, et 143 GW de PV et d'éolien ont produit 0,5 GW. Rien que pour de telles journées, même si elles ne se produisent que rarement, il faudrait maintenir une infrastructure de secours de près de 100 % ou procéder à des coupures à grande échelle pour éviter un effondrement du système.

De même, la comparaison des coûts d'un kilowattheure (kWh) issu du nucléaire, du gaz, du charbon, du photovoltaïque ou de l'éolien est généralement boiteuse. Il ne faut pas se contenter de comparer les coûts de production purs. La plupart des sources d'électricité entraînent également des coûts indirects. Il peut s'agir du simple démantèlement d'une éolienne mais aussi de coûts complexes comme le stockage définitif des déchets nucléaires. Certains de ces coûts ne peuvent être qu'estimés. Les subventions doivent également être prises en compte dans la comparaison. Souvent, le facteur essentiel d'une mise à disposition fiable pendant un nombre défini d'heures par an n'est pas pris en compte. C'est pourquoi il n'existe guère de valeurs comparatives utilisables et sérieuses<sup>46</sup>, même si l'on se plaît à présenter les choses autrement. En effet, il faudrait pour cela effectuer un calcul des coûts complets avec les coûts de stockage nécessaires et le besoin d'infrastructure supplémentaire pour pouvoir établir une comparaison. De plus, les coûts environnementaux causés par exemple par les centrales à combustibles fossiles ou d'autres coûts annexes et consécutifs font partie d'un calcul comparatif honnête.

### 1.4.9 Fausses affirmations sur la décentralisation

On entend volontiers dire que le développement des installations éoliennes et photovoltaïques entraîne une décentralisation, ce qui est une erreur. En effet, la manière dont le tournant énergétique a été mis en place jusqu'à présent rend de plus en plus nécessaires des structures centralisées et les dépendances ne sont pas réduites mais même augmentées.

Ainsi, de nombreuses installations photovoltaïques se trouvent certes au niveau de la basse tension, c'est-à-dire de manière décentralisée mais l'ensemble de l'approvisionnement en électricité ne fonctionnerait pas si le courant excédentaire local ne pouvait pas être évacué, ce qui se produit désormais jusqu'aux niveaux de très haute tension. D'autre part, il ferait rapidement nuit noire si le soleil se couchait ou si des nuages passaient par-dessus et qu'il n'y avait pas d'approvisionnement à partir du système central. Même les parcs éoliens ne peuvent être exploités qu'avec le système centralisé et les mesures de compensation nécessaires. Nous sommes actuellement très loin d'une véritable décentralisation, telle qu'elle devrait être recherchée.

Un problème qui reste à résoudre est le remplacement de la réserve momentanée actuelle.<sup>47</sup> Celle-ci est jusqu'à présent disponible de manière inhérente dans le système électrique et ce en raison de l'inertie des masses tournantes des centrales électriques conventionnelles. Avec la baisse de la part de marché des centrales conventionnelles, leurs propriétés de soutien du système ne sont plus disponibles qu'en quantité nettement réduite à certaines heures. A cela s'ajoute le fait que les grandes centrales électriques étaient jusqu'à présent principalement implantées dans le sud de l'Allemagne, alors que la masse des énergies renouvelables est produite dans le nord, où le vent souffle, ou même en mer. Indépendamment de la mise à disposition de services système tels que la réserve momentanée pour la sécurité d'approvisionnement, chaque GRT devra également garantir à l'avenir une puissance de production sécurisée suffisamment dimensionnée pour couvrir la de-

<sup>46</sup> Cf. [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf). Consulté le 01.10.2023.

Cf. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#umweltkosten-der-strom-und-waermeerzeugung>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>47</sup> Cf. [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9142\\_Studie\\_Momentanreserve\\_2030.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9142_Studie_Momentanreserve_2030.pdf). Consulté le 01.10.2023.

mande en électricité en cas d'absence de production d'énergies renouvelables pour des raisons météorologiques. Pour ce faire, on discute également de l'inertie synthétique provenant des installations de conversion de l'énergie éolienne.

En outre, personne ne peut actuellement vraiment s'imaginer comment un réseau électrique pourrait être remis en marche après une panne majeure avec des installations de production non pilotables et un manque d'énergie de réglage [voir Reichl et al. (2015)]. Des solutions existent. Mais ce qui fait défaut, c'est la mise en œuvre.

#### **1.4.10 Unités fonctionnelles décentralisées (« cellules énergétiques »)**

Pour que l'on puisse parler d'une véritable décentralisation, il faudrait que des unités fonctionnelles décentralisées (« cellules énergétiques ») soient mises en place.<sup>48</sup> Les réseaux de distribution voient arriver de plus en plus de nouvelles installations : des millions de petites centrales électriques, des bornes de recharge électrique, des pompes à chaleur ou des climatiseurs en tant que gros consommateurs, pour lesquels l'infrastructure n'a jamais été conçue. De plus, de nombreux nouveaux acteurs qui souhaitent anticiper le marché de l'électricité ou contribuer à la flexibilisation de la consommation doivent être intégrés et mis en réseau, ce qui augmente encore la complexité du système.

Le problème particulier est qu'un système de plus en plus complexe ne peut pas être géré avec la structure et la logique centrales qui ont fait leurs preuves jusqu'à présent. Il faut au contraire « orchestrée » cette multitude de composants et d'acteurs afin qu'ils contribuent de manière automatisée à garantir la sécurité d'approvisionnement.<sup>49</sup> Une approche cellulaire est donc beaucoup plus prometteuse car la complexité croissante ne pourra pas être maîtrisée autrement.<sup>50</sup> Les systèmes complexes ne peuvent pas être pilotés de manière centralisée mais nécessitent des unités autonomes décentralisées,<sup>51</sup> dans lesquelles les besoins, le stockage et la production sont équilibrés autant que possible au niveau local ou régional [voir Vester (2011 8)].

Le système de cellules énergétiques doit également exploiter les synergies entre les différents systèmes. Le couplage des secteurs doit y contribuer : les secteurs de l'électricité, de la chaleur et des transports doivent être transformés de manière à mieux utiliser les formes d'énergie renouvelables volatiles [cf. Erlhofer (2023). p. 281 et suivantes]. Il s'agit donc d'un approvisionnement énergétique global dans des structures cellulaires qui nécessitent un changement global de mentalité.<sup>52</sup> Une telle approche n'est pas non plus en contradiction avec le système existant à grande échelle qui reste nécessaire pour pouvoir alimenter de grandes entreprises industrielles ou des villes. Ces structures et unités fonctionnelles décentralisées permettent toutefois d'accroître la robustesse de l'ensemble du système, de bas en haut et en cours d'exploitation, sans interruptions.<sup>53</sup> L'idée de base et l'infrastructure de base d'Internet reposent également sur ces considérations.

Les structures cellulaires pourraient ne pas être aussi efficaces en fonctionnement continu que le système à grande échelle précédent. Cela change radicalement en cas de panne majeure sous forme de blackout. Dans ce cas, tous les gains d'efficacité réalisés jusqu'à présent seraient anéantis d'un coup et il faudrait s'attendre à d'énormes dommages sociaux imprévisibles. La résilience et la robustesse sont en contradiction avec notre pensée de l'efficacité purement motivée par l'économie d'entreprise qui renonce volontiers aux redondances et aux réserves indispensables à la survie.<sup>54</sup> Une approche centralisée, telle qu'elle est souvent encouragée actuellement par les réflexions sur le « réseau intelligent (Smart Grid) », augmente la vulnérabilité centrale du système et devrait donc être évitée. L'idée de la structure cellulaire peut également être déduite de l'évolution où tout ce qui vit est organisé en structures cellulaires. Cela a manifestement fait ses preuves et a survécu. Tout le reste a été éliminé.

#### **1.4.11 Réduction de la demande d'énergie versus augmentation de la consommation d'électricité**

Pour faire avancer la transition énergétique tout en évitant de surcharger les structures existantes, il est indispensable de réduire fondamentalement la demande d'énergie. Tout ce qui ne doit pas être utilisé produit et stocké, contribue le plus rapidement à la réalisation des objectifs. Il existe encore souvent d'importants potentiels dans ce domaine avant que la perte

<sup>48</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/energiezellensystem>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>49</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/2018/blog/stromversorgung/weckruf-orchestrieren-statt-steuern>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>50</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/hintergrundthemen/vernetzung-komplexitaet>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>51</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/hintergrundthemen/vernetzung-komplexitaet/#systemdesign>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>52</sup> Cf. <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/vde-zeigt-loesungsansatz-fuer-zellulares-energiesystem>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>53</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/2016/blog/energiezellensystem/spiders>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>54</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/hintergrundthemen/resilienz-und-anpassung>. Consulté le 01.10.2023.

de confort souvent redoutée ne se produise. C'est ce qu'a révélé la crise énergétique de 2022 qui a permis de réaliser des économies plus importantes que prévu.

La décarbonation visée de tous les secteurs (mobilité, chauffage, industrie, etc.) rend en outre nécessaire le remplacement croissant des sources d'énergie fossiles par l'électricité. Parallèlement, la numérisation, l'e-mobilité, les pompes à chaleur ou la climatisation entraînent une nouvelle augmentation énorme prévisible des besoins en électricité. À cela s'ajoute le fait que ces applications présentent des charges de pointe très élevées pour lesquelles les infrastructures existantes, notamment les réseaux de distribution, ne sont pas conçues. Des renforcements et des adaptations massifs sont donc nécessaires. Cela ne sera toutefois possible que de manière limitée dans un avenir prévisible, de sorte que des problèmes considérables se profilent au niveau du réseau de distribution, lorsque des puissances d'injection ou des charges trop élevées entraîneront de plus en plus souvent des surcharges du réseau.<sup>55</sup> Une utilisation plus consciente de l'énergie et une réflexion au-delà des limites du système, afin de pouvoir utiliser de manière optimale les potentiels de synergie, n'ont pas encore été atteintes. Dans la nature, outre la réduction des besoins en énergie et en ressources, la décentralisation ainsi que la facilité/tolérance aux erreurs et la diversité sont apparues comme des concepts essentiels au succès de systèmes complexes (sur)viables [cf. Vester (2011 8)]. Mais ces connaissances doivent d'abord être intégrées dans la transformation en cours.

#### **1.4.12 Numérisation du système énergétique**

La numérisation est l'un des » mots magiques « qui influencera tous les aspects de la société. L'Internet des objets (en anglais » Internet of Things « , IoT) équipera les objets physiques (machines à laver, réfrigérateurs et bien d'autres), les objets en réseau (notamment les voitures, les smartphones, les bracelets de fitness), les machines conventionnelles et les installations numérisées dans les usines, des processus industriels entiers et toujours plus de technologies de l'information et de la communication (TIC ; également technologies de l'information et de la communication), ainsi que de capteurs et de techniques d'entraînement (actionneurs), et les reliera en outre à Internet [cf. Erlhofer (2023). p. 410 et suivantes]. L'électricité, Internet et la numérisation ne peuvent plus être considérés séparément.

Dans la nouvelle réalité de l'électricité, il n'est plus possible de garantir au consommateur qu'il pourra prélever à tout moment autant d'électricité qu'il le souhaite car il se peut que l'électricité ne soit pas disponible à ce moment-là.

Un » réseau électrique intelligent « (smart grid, Internet of Energy) est destiné à contribuer à ce scénario. Il régule les consommateurs de manière à ce que seule la quantité d'électricité actuellement disponible soit consommée : grâce à la communication (échange de données) dans les deux sens rendue possible par un réseau intelligent, la consommation d'électricité peut et sera favorisée en période de surplus d'énergie ou étranglé lorsque moins d'énergie est disponible [cf. Erlhofer (2023). p. 293 et suiv.].

Même les » réseaux intelligents « et les mesures de flexibilisation prônées dépendent d'une mise en réseau informatique centrale globale et donc d'une complexité croissante. Il en résulte, outre le risque de cyber-attaques ou d'incidents, d'autres effets secondaires à peine remarqués.

Le réseau intelligent englobera tous les niveaux de réseau et tous les groupes de consommateurs. Des produits innovants (p. ex. compteurs intelligents) et des concepts (p. ex. maison intelligente) promettent un système » intelligent « , même si » l'intelligence « cache des systèmes de communication complexes basés sur des logiciels. La condition centrale est un échange d'informations - en fait une disponibilité des données de bas en haut, autrement dit un client » transparent « qui met ses données à disposition sans restriction.

Tout doit non seulement être disponible mais aussi, premièrement, être transparent et deuxièmement, être utilisé de manière cohérente, c'est-à-dire partout. Ce n'est qu'à cette condition que les objectifs pourront être atteints. Le client est alors informé du moment où il peut dégivrer le réfrigérateur, laver le linge et le sécher. Il ne s'agira plus de savoir si nous minimisons notre propre facture d'électricité grâce à une meilleure technologie (ampoules à économie d'énergie) ou à un comportement adapté (éteindre les appareils en mode veille). Nous sommes censés réapprendre et agir pour l'ensemble du réseau électrique. Si nous ne le faisons pas correctement, nous serons » punis « et on nous demandera de payer via des tarifs plus élevés.

Avec la numérisation croissante de l'alimentation électrique, les dépendances mutuelles augmentent également : sans électricité, pas d'informatique. Sans infrastructure informatique, pas d'alimentation électrique. Les experts craignent

---

<sup>55</sup> Cf. <https://www.netzampel.energy/home>. Consulté le 01.10.2023.

qu'aujourd'hui encore, une éventuelle reconstruction du réseau échoue parce que de plus en plus de dispositifs de protection sont automatisés et qu'il existe de moins en moins de niveaux de secours non numériques.

Les compteurs intelligents ouvrent un autre champ avec les » big data « qui à leur tour, ne peuvent être surveillées et évaluées que numériquement.

Dans le » monde intelligent «, de plus en plus d'applications numériques émergent sur le marché de l'électricité et de la flexibilité. Ce qui crée de la valeur ajoutée dans la vie quotidienne peut rapidement se transformer en contraire, comme l'ont démontré la grave cyberattaque contre le plus grand oléoduc aux États-Unis en mai 2021<sup>56</sup> ou contre l'entreprise de logistique de réservoirs en Allemagne en février 2022<sup>57</sup>. La panne liée à la guerre de 5 800 modems satellite dans les éoliennes allemandes aurait également pu déclencher de graves effets en cascade.<sup>58</sup> En général, les prestataires régionaux ne sont souvent pas protégés contre les pirates informatiques. Jusqu'à présent, nous nous en sommes probablement tirés à la légère le plus souvent mais cela contribue également à l'illusion de la dinde (voir la section sur l'illusion de la dinde ci-dessous).

Quatre domaines de risques affectent tous le » système électrique « sensible : la force majeure, la technologie, l'organisation et les personnes. En raison de la diversité des interfaces, elle ne peut être que relativement protégée. La vulnérabilité demeure et s'accroît de plus en plus. Les facteurs de stress agissent toujours en combinaison.

Il n'est pas non plus nécessaire qu'il y ait toujours une intention de nuire. Une cyberattaque incontrôlée - comme dans le cas de la destruction des modems satellites - ou même une panne grave peut avoir des conséquences en cascade dans le monde physique, notamment dans un système aussi sensible que l'approvisionnement en électricité. Voir par exemple la panne du système de contrôle-commande en Autriche en 2013.<sup>59</sup>

Là encore, un système de cellules énergétiques permettrait de remédier à cette situation car les unités et les structures plus petites sont plus faciles à maîtriser et à reconstruire, ou les erreurs ou les pannes sont plus faciles à tolérer et ne peuvent pas avoir de répercussions à grande échelle. Certes, un certain soutien informatique est également nécessaire dans les cellules mais avec des exigences différentes de celles d'un système centralisé. Ainsi, le besoin de communication et les contenus avec d'autres cellules, et donc la surface d'intervention, peuvent être considérablement réduits. La tolérance aux erreurs au niveau décentralisé augmente la robustesse au niveau central et constitue une caractéristique essentielle des systèmes viables.<sup>60</sup>

### 1.4.13 Besoin en ressources

Même si les énergies primaires du soleil et du vent sont gratuites, elles ne sont pas disponibles à tout moment comme l'exige notre système d'alimentation électrique actuel, et les énormes ressources et infrastructures nécessaires ne sont pas non plus gratuites.

Pour produire la même quantité d'énergie qu'une centrale à charbon, par exemple, les installations photovoltaïques ont besoin de deux fois plus de ressources, les éoliennes terrestres de cinq fois plus et les éoliennes terrestres offshore de sept fois plus.<sup>61</sup> Et ce, sans compter les besoins supplémentaires en infrastructures dus à un besoin nettement plus important de lignes ou de stockage.

La numérisation et la transformation numérique, l'industrie 4.0, le cloud computing, le big data et l'analytique, les maisons intelligentes et les machines intelligentes et autonomes, l'internet des objets et l'internet des valeurs (blockchain2, bitcoin), la puissance de calcul (computing power), tout cela nécessite de l'énergie. Pour la produire, la stocker et la distribuer, il faut des quantités de matières premières jusqu'ici insoupçonnées. Il faut y ajouter les efforts de transformation dans de nombreuses régions du monde qui s'accompagnent d'un besoin en ressources encore plus important. Parallèlement, peu de nouveaux gisements ont été mis en exploitation ces dernières années. L'expérience montre que l'exploitation d'une nouvelle

<sup>56</sup> Cf. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/colonial-pipeline-cyberangriff-legt-betrieb-grosser-benzin-pipeline-in-den-usa-lahm-27173390.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>57</sup> Cf. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energieversorgung-cyberangriff-legt-oiltanking-tanklager-deutschlandweit-vollstaendig-lahm-tank-wagen-beladung-ausser-betrieb/28023918.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>58</sup> Cf. <https://www.reversemode.com/2022/03/satcom-terminals-under-attack-in-europe.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>59</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/blackout/risiko-eines-strom-blackouts/leittechnikstoerung>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>60</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/hintergrundthemen/vernetzung-komplexitaet/#systemdesign>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>61</sup> Cf. The energy transition delusion: inescapable mineral realities. <https://www.youtube.com/watch?v=sgOEGKDVvsg>. Consulté le 01.10.2023.

mine dure environ 15 ans, de sorte qu'il faut s'attendre à des pénuries importantes dans les années à venir et donc à d'énormes hausses de prix,<sup>62</sup> ce qui freinerait encore la transformation.

Le ministère américain de l'énergie analyse régulièrement<sup>63</sup> l'état de l'approvisionnement en matières premières critiques pour la transition énergétique. La dernière édition, datée de mai 2023, examine la disponibilité de 23 matériaux essentiels pour les technologies énergétiques propres. Pour 13 de ces matières premières, le ministère estime qu'il existe des risques importants que l'offre ne puisse pas suivre la demande. Il s'agit du nickel, du platine, du magnésium, du carbure de silicium et du praséodyme, notamment en raison de leur rôle dans les batteries et la construction légère de véhicules. Mais aussi le néodyme, le dysprosium et le terbium qui sont utilisés dans les aimants des moteurs de voitures électriques et les générateurs d'éoliennes, ainsi que le graphite naturel qui devient de plus en plus important pour les batteries. En raison de la demande croissante en technologies d'énergie solaire, de l'électrification mondiale et de l'allègement des véhicules, l'aluminium, le cuivre et le silicium se feront également rares à moyen terme. Les analystes ne considèrent ici que la disponibilité théorique des matières premières et non la disponibilité réelle qui résulte de la position des différents États en matière d'extraction et de transformation.<sup>64</sup> Dans tout cela, il existe une très forte dépendance vis-à-vis de la Chine. Outre de nombreuses matières premières importantes, une grande partie du traitement des matières premières en matériaux transformables qui nécessite beaucoup d'énergie, a notamment lieu en Chine [voir Fremerey et al. (2022)].

En ce qui concerne les besoins en ressources, il faut également mentionner le manque de personnel qualifié qui n'épargne pas le domaine de l'électrotechnique. Il ne s'agit pas seulement d'avoir suffisamment de monteurs pour le montage d'installations photovoltaïques mais aussi pour l'ensemble de l'aménagement et de l'exploitation des infrastructures.<sup>65</sup> Il ne faut pas non plus se limiter au seul domaine de l'électrotechnique. En effet, la transition énergétique nécessite également de plus en plus de systèmes informatiques (« Smart », flexibilisation, etc.). Or, c'est justement dans le secteur IT qu'il existe depuis longtemps un manque flagrant de personnel qualifié. Et il s'agit d'un problème international qui touche de nombreux pays en Europe. La capacité en personnel disponible devient donc également un facteur limitant pour la transition énergétique et une exploitation sûre du système.

## 1.5 Autres domaines problématiques

Il existe en outre d'autres facteurs externes qui peuvent compromettre la sécurité du système. Cette liste n'est évidemment pas exhaustive.

### 1.5.1 Événements météorologiques extrêmes

À mesure que la crise climatique progresse, une augmentation des événements météorologiques extrêmes est également à prévoir en Europe, comme ceux déjà observés en Australie, en Californie, au Texas, ou en 2023 dans de nombreuses régions d'Europe [cf. APCC (2014)]. De tels événements s'accompagnent souvent de graves dommages et pannes d'infrastructures.

Les sécheresses extrêmes entraînent des problèmes de refroidissement dans les centrales électriques conventionnelles. Dans le même temps, la puissance des centrales hydroélectriques diminue en raison de la baisse du niveau d'eau ou il n'est plus possible de transporter suffisamment de charbon sur les fleuves jusqu'aux centrales.<sup>66</sup> Dans d'autres cas extrêmes, les inondations ou les fortes pluies entraînent également des problèmes de production d'électricité, comme en juin 2020, lorsqu'un épisode de fortes pluies a mis hors service la plus grande centrale à charbon polonaise, entraînant une pénurie d'approvisionnement critique.<sup>67</sup> De même, les centrales à accumulation par pompage peuvent atteindre leurs limites en raison d'une fonte tardive de la neige, comme au printemps 2021. Des tempêtes ou des pluies verglaçantes peuvent entraîner des pannes d'infrastructure de grande ampleur, comme en 2005 dans le Münsterland.<sup>68</sup> Les cellules énergétiques n'ont pas été épar-

<sup>62</sup> Cf. Critical Materials Assessment. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-05/2023-critical-materials-assessment.pdf>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>63</sup> Cf. Mark Mills: The energy transition delusion: inescapable mineral realities. <https://youtu.be/sgOEGKDVvsg>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>64</sup> Cf. la pénurie de matières premières va aider l'énergie nucléaire à renaître. <https://think-beyondtheobvious.com/stelter-in-den-medien/rohstoffmangel-wird-kernenergie-zur-renaissance-verhelfen>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>65</sup> Cf. branche de l'électrotechnique : une étude confirme la grave pénurie de main-d'œuvre qualifiée. <https://www.ove.at/ove-news/details/elektrotechnik-branche-studie-bestaetigt-akuten-fachkraeftemangel>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>66</sup> Cf. Les basses eaux menacent les centrales à charbon : le regard angoissé sur le Rhin vide. <https://www.rnd.de/wirtschaft/trockenheit-in-deutschland-das-niedrigwasser-im-rhein-gefaehrdet-kohlekraftwerke-NSYQHFXV3BE4RM764XV2NWTG5M.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>67</sup> Cf. <http://www.fette-competence-in-energy.com>. Consulté le 01.10.2023

<sup>68</sup> Cf. <https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/2020/12/15-jahre-schneekatastrophe-muensterland.html>. Consulté le 01.10.2023

gnées par de tels événements. Le risque de pannes à grande échelle pourrait toutefois être considérablement réduit. Les cellules n'offrent pas en soi une plus grande sécurité d'approvisionnement ou une plus grande robustesse. Mais elles contribuent à limiter le potentiel de dommages, ce qui devient de plus en plus important au vu des problèmes présentés.

### 1.5.2 Sabotage, terreur, cyberattaques

En outre, il existe un certain nombre d'autres événements perturbateurs potentiels qui pourraient entraîner des pannes de courant généralisées et qui sont associés à une intention externe de nuire. Les attaques de sabotage les plus graves contre des infrastructures critiques à ce jour ont eu lieu en 2022 et 2023.

La destruction des infrastructures gazières Nord Stream 1 et 2 en septembre 2022 est sans précédent dans l'histoire de l'Europe hors guerre. De même, la destruction d'un barrage majeur au cours de la guerre en Ukraine était sans précédent. Sans parler des combats autour des installations nucléaires.

Beaucoup de choses qui étaient considérées comme impossibles jusqu'à récemment se sont finalement produites soudainement. Il existe également des attaques de sabotage répétées contre la Deutsche Bahn ou contre les infrastructures électriques.<sup>69</sup> Cyberattaques en tout cas.<sup>70</sup> Personne ne peut donc exclure la possibilité de réactions en chaîne, intentionnelles ou non, dans les infrastructures électriques et d'approvisionnement, dans le cadre d'une nouvelle escalade qui ne doit pas être ignorée.

La connaissance des systèmes complexes montre qu'il ne suffit pas de se fier à l'improbable qui ne se produira pas. La combinaison de différents facteurs perturbateurs qui ne peuvent être définitivement maîtrisés peut et va conduire à des perturbations qui comportent un risque de défaillance du système dans son ensemble : les événements climatiques et météorologiques, les défauts techniques, le comportement humain, les aspects financiers, ne sont que des exemples de » déclencheurs « pour de tels développements [cf. Erlhofer (2023). p. 410 et suiv.].

## 1.6 Évaluation des risques

Cette approche systémique globale, bien que loin d'être exhaustive, des bouleversements actuels du système d'approvisionnement en électricité européen a mis en évidence une série de problèmes dont la fréquence et l'intensité croissantes devraient avoir des répercussions négatives sur la sécurité d'approvisionnement, jusqu'ici très élevée en Europe.

Même si les différents acteurs font de leur mieux pour maintenir la stabilité et la sécurité du système, il doit être clair que le risque de panne à grande échelle augmente inévitablement dans de telles conditions. Les événements isolés peuvent être très bien gérés au quotidien et sans autre perception publique, y compris médiatique. Mais si plusieurs événements se produisent simultanément ou s'il y a même une intention externe de causer des dommages, il peut rapidement y avoir une transition de phase et une panne de système à grande échelle. Il ne s'agit pas ici de la probabilité mais des dommages prévisibles qui devraient justifier une prévention générale contre le blackout, ce qui sera examiné plus en détail dans la deuxième partie de cet article.

Les méthodes actuelles d'évaluation des risques et de calcul de la probabilité d'occurrence ne sont que partiellement adaptées dans ce cas car il s'agit d'un événement à fort impact et faible probabilité (HILP High Impact Low Probability/ LP-HC Low Probability – High Consequences). Événement réalisé de faible probabilité d'occurrence mais aux conséquences importantes voire catastrophiques pour lequel un calcul de probabilité n'est pas applicable en raison de l'absence d'évidence. Ainsi, des affirmations telles que » il n'y a pas de risque immédiat ou aigu de blackout, il est très peu probable qu'un blackout se produise, etc. « sont certes correctes sur le moment et avec un regard dans le rétroviseur mais elles ne tiennent pas compte des bouleversements actuels et des interactions systémiques.

Ils conduisent même à une fausse sécurité dangereuse. En effet, pourquoi d'autres acteurs devraient-ils se pencher sur le thème de la prévoyance alors que celle-ci est de toute façon improbable et qu'il faut en même temps relever de nombreux défis aigus au quotidien ? Minimiser le danger, c'est méconnaître la portée d'un tel événement potentiel et, compte tenu des graves perturbations auxquelles il faut s'attendre, c'est irresponsable voire négligent.

<sup>69</sup> Cf. poutre en acier sciée - grand pylône électrique renversé à Grevenbroich. [https://rp-online.de/nrw/staedte/grevenbroich/grevenbroich-strommast-umgeknickt-sabotage-nicht-ausgeschlossen\\_aid-86460965](https://rp-online.de/nrw/staedte/grevenbroich/grevenbroich-strommast-umgeknickt-sabotage-nicht-ausgeschlossen_aid-86460965). Consulté le 01.10.2023.

<sup>70</sup> Cf. fournisseur d'énergie américain découvrant un virus informatique présumé russe. <https://www.berliner-zeitung.de/hacker-us-energieversorger-entdeckt-mutmasslich-russischen-computer-virus-li.407499>. Consulté le 01.10.2023.

Les événements HILP nécessitent des approches complémentaires, comme le concept d'antifragilité [voir Taleb (2013)] ou les méthodes de l'éthique du risque qui ne se concentrent pas sur la probabilité mais sur l'ampleur potentielle des dommages [voir Mukerji et al. (2020)], afin de déduire les mesures nécessaires. Une telle approche fait cependant défaut jusqu'à présent dans de nombreux domaines. Ce déficit dans la manière de penser se répercute directement sur la communication urgente et nécessaire en matière de sécurité. Si cela ne doit pas se produire, il n'est pas nécessaire d'en parler.

C'est pourquoi la plupart des mesures de prévention se concentrent sur la prévention d'un tel événement ou se limitent aux conséquences dans le système d'alimentation électrique, ce qui est nettement insuffisant [voir ITA et al. (2022)].

Le fait que la responsabilité de la mise en place et du maintien de mesures de protection et de prévention soit attribuée aux spécialistes et aux exploitants d'infrastructures critiques et qu'elle soit rayée de l'ordre du jour est un facteur aggravant.

Jusqu'à présent, le système européen d'approvisionnement en électricité a bien résisté à de nombreuses interventions non systémiques. C'est pourquoi de nombreux secteurs sont convaincus que cela continuera à l'avenir, ce qui pourrait s'avérer être une erreur grave et dangereuse. Cette erreur potentielle est appelée « illusion de la dinde » dans le domaine des sciences du risque [voir Taleb (2013 5)].

### 1.6.1 Illusion de la dinde

Une dinde qui, vivant dans sa communauté sociale, est nourrie quotidiennement par son propriétaire, part du principe sur la base de ses expériences positives quotidiennes (alimentation et soins), que le propriétaire a de bonnes intentions à son égard. Il ne compte pas seulement sur la satisfaction de ses besoins fondamentaux par une source extérieure. Elle considère également comme allant de soi la protection fondamentale contre les dangers. Il manque à la dinde l'information essentielle selon laquelle cette protection globale n'a pour but que de la manger à la fin. La veille de Thanksgiving, jour où les dindes sont traditionnellement abattues, il a une mauvaise surprise.

Cette métaphore décrit le traitement fréquent d'événements rares qui entraînent d'énormes répercussions sociales, appelés High Impact Low Probability (HILP) Events, événements extrêmes » événements X «) ou chocs stratégiques [cf. Casti (2012), Casti et al. (2017), Thurner (2020)]. L'absence de preuves est volontiers confondue avec l'absence d'événements [cf. Taleb (2013)].

C'est pourquoi toute l'anticipation du blackout ne porte pas sur la probabilité mais sur la question de savoir si nous pourrions, en tant que société, faire face à un tel événement. Le secteur de l'énergie mettra tout en œuvre pour rétablir l'approvisionnement en électricité le plus rapidement possible. Cependant, un blackout n'est pas seulement une panne de courant suprarégionale mais il entraîne un effondrement de presque toutes les structures d'approvisionnement et la véritable crise ne commence qu'après la panne de courant.

### 1.6.2 Perturbations majeures comme signaux d'alarme possibles

Le 8 janvier 2021 et le 24 juillet 2021, deux incidents majeurs se sont produits sur le réseau ENTSO-E/RG CE, au cours desquels le réseau d'Europe centrale a été scindé en deux sous-réseaux<sup>71</sup>. Comparé à l'incident le plus grave survenu le 4 novembre 2006, il s'agit d'un incident mineur. En 2006, environ 10 millions de foyers d'Europe occidentale ont dû être déconnectés du réseau électrique en 19 secondes pour éviter un blackout à l'échelle européenne.<sup>72</sup> Le 8 janvier 2021, « seules » les grandes entreprises clientes en France et en Italie ont été touchées à hauteur de la consommation d'électricité de Vienne. Ceux-ci avaient auparavant accepté par contrat de procéder à de telles coupures d'urgence et ont été indemnisés en conséquence.

Lors de la deuxième perturbation majeure et de la séparation du réseau le 24 juillet 2021, environ 2 millions de clients ont dû être déconnectés du réseau dans la péninsule ibérique afin d'éviter le pire.

Grâce aux mesures de précaution et de communication constamment améliorées des gestionnaires de réseau de transport européens depuis 2006, les perturbations ont été éliminées et parfaitement contrôlées au bout d'une heure dans chaque cas. Néanmoins, une telle resynchronisation n'est pas anodine et conduit régulièrement à des pannes totales dans la simulation. En outre, il n'y a eu jusqu'à présent » que « trois autres perturbations majeures avec coupures de réseau dans l'histoire

<sup>71</sup> Cf. <http://www.fette-competence-in-energy.com>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>72</sup> Cf. [https://de.wikipedia.org/wiki/Stromausfall\\_in\\_Europa\\_im\\_November\\_2006](https://de.wikipedia.org/wiki/Stromausfall_in_Europa_im_November_2006). Consulté le 01.10.2023.

du réseau : une panne d'électricité en Italie en 2003, une panne dans toute l'Europe en 2006 et une panne en Turquie en 2015.<sup>73</sup>

Personne ne peut garantir que les mécanismes de sécurité prévus fonctionneront suffisamment et à temps lors du prochain incident. Dans le pire des cas, une panne de courant suprarégionale pourrait en effet se produire, comme l'espérait l'armée autrichienne [cf. BMLV (2019)] ou l'auteur dans les cinq prochaines années, c'est-à-dire à court terme.

Quoi qu'il en soit, les deux événements de grande ampleur de 2021 peuvent être compris comme de sérieux avertissements et des « signaux faibles » dans le sens de « faire face à l'inattendu ». [cf. Weick et coll. 2010 2].

## 1.7 Résumé

Toute transformation entraîne des conflits d'objectifs. Il serait donc d'autant plus important de les aborder clairement et de les rendre transparents afin d'obtenir l'approbation la plus large possible. Or, cela se fait trop peu, ce qui entraîne de plus en plus souvent des déceptions et une perte de confiance.

Les grands projets d'infrastructure nécessitent une sécurité de planification à long terme. Or, celle-ci ne peut pas être garantie en raison de l'évolution rapide des conditions politiques, comme le montrent par exemple la sortie du charbon en Allemagne d'ici 2022 et la nouvelle prolongation de la durée de vie des centrales à charbon. Chaque nouvelle intervention entraîne des effets retardés et une réticence croissante à investir dans des projets d'infrastructure à long terme. Surtout lorsque la décision n'est plus compréhensible sur le fond. En outre, la vision à court terme rétrécie par l'économie d'entreprise, empêche de trouver des solutions viables à long terme. Au contraire, on observe de plus en plus souvent un activisme dangereux, dans lequel on recourt volontiers à des solutions dites « quick and dirty » (signifiant littéralement « rapide et sale » qu'on peut traduire par « vite fait mal fait »).

Celles-ci se concentrent sur le symptôme et peuvent souvent être mises en œuvre rapidement tandis qu'une solution fondamentale tente d'éliminer la cause du problème. Les solutions « quick and dirty » aggravent à long terme le problème réel tandis que les solutions fondamentales présentent souvent des inconvénients majeurs à court terme et ne s'avèrent bénéfiques qu'à long terme [voir Ossimitz (2006)]. Un problème qui se retrouve tout au long de la transition énergétique.

De nombreux acteurs partent en outre du principe que le marché réglera tout cela si on le laisse faire. Là encore, il s'agit d'une approche très audacieuse et dangereuse dans un système où la disponibilité des ressources nécessaires doit être garantie en permanence. En effet, le marché pur prévoit également l'échec et l'abandon, ce qui, dans le système d'approvisionnement en électricité, équivaut à un suicide.

Dans le pire des cas, l'État, c'est-à-dire la collectivité, doit intervenir pour garantir la sécurité de l'approvisionnement.

A condition que cela se fasse à temps. La crise du gaz de 2022 peut servir d'exemple. Bien que des avertissements aient été émis dès le milieu de l'année 2021 en raison de réserves de gaz insuffisantes, ils ont manifestement été ignorés. Lorsque la situation s'est complètement dégradée à la mi-2022, le gaz a été acheté à n'importe quel prix, ce qui a encore fait grimper les prix. Heureusement, l'hiver 2022/23 a été très doux, ce qui a permis d'éviter l'escalade attendue.<sup>74</sup> Seul l'avenir nous dira s'il en sera de même pour l'hiver prochain.<sup>75 76</sup> On peut toutefois douter qu'il soit judicieux de compter de plus en plus souvent sur des circonstances heureuses.

L'un des principaux obstacles à l'adaptation nécessaire semble être notre cadre de pensée linéaire » soit l'un, soit l'autre «.

Or, pour gérer la complexité, il est impératif de penser « aussi bien l'un que l'autre »<sup>77</sup>, ce qui permet également de gérer les contradictions et les conflits d'objectifs car ceux-ci sont inévitables [voir Erlhofer (2023), chapitre 4].

<sup>73</sup> Cf. Blackout en Turquie : une chaîne d'erreurs était-elle responsable ? <https://www.saurugg.net/2015/blog/stromversorgung/blackout-in-der-tuerkei-war-eine-kette-von-fehlern-verantwortlich>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>74</sup> Cf. hiver catastrophique 2022/23 - fiction ou bientôt réalité ? <https://www.saurugg.net/wp-content/uploads/2022/07/gfkw-katastrophenwinter-2023.pdf>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>75</sup> Cf. l'Allemagne envisage le retour de 1,9 GW de lignite pour l'hiver 2023-24. <https://www.argusmedia.com/en/news/2479617-germany-examines-19gw-lignite-winter-202324-return>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>76</sup> Cf. situation électrique incertaine pour l'hiver prochain. <https://www.srf.ch/news/schweiz/energieversorgung-ungewisse-stromlage-fuer-den-kommenden-winter>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>77</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/hintergrundthemen/#sowohl-als-auch>. Consulté le 01.10.2023.

Un approvisionnement en électricité et en énergie qui fonctionne et qui est abordable en général est une condition essentielle pour la prospérité de la société, de sorte que les interventions dans ce domaine devraient être effectuées avec beaucoup de soin et de réflexion, ce qui implique également un examen permanent des effets secondaires possibles.

Il ne faut pas perdre de vue le » risque secondaire «. On entend par là des » effets secondaires « sociaux incalculables qui se traduisent par une perte de confiance politique, une désaffection pour la politique, un sentiment de colère et une désaffection pour les structures politiques conventionnelles. Ceux-ci ne peuvent pas être apaisés par les rituels bien rodés d'une » évaluation classique des risques «.

## **2 Une panne d'électricité suprarégionale («blackout»)**

Une panne majeure suprarégionale sous forme de black-out est la conséquence d'un déséquilibre massif de puissance dans le système interconnecté européen. En principe, il existe des mécanismes de sécurité étendus pour empêcher un tel événement grave. Cependant, il n'existe pas de sécurité à 100 %, comme l'ont clairement indiqué les gestionnaires de réseau de transport européens en 2015 après le blackout en Turquie :

» A large electric power system is the most complex existing man-made machine. Although the common expectation of the public in the economically advanced countries is that the electric supply should never be interrupted, there is, unfortunately, no collapse-free power system. « [ENTSO-E (2015). p. 46.]

» Un grand réseau électrique est la machine la plus complexe construite par l'homme. Bien que le public des pays économiquement avancés s'attende à ce que l'approvisionnement en électricité ne soit jamais interrompu, il n'existe malheureusement pas de système électrique exempt d'effondrement. « [ENTSO-E (2015). p. 46.]

La conséquence d'un tel déséquilibre de puissance serait une déconnexion entièrement automatique à grande échelle des installations des clients et des équipements en l'espace de quelques secondes à quelques minutes. Certaines parties du réseau de transport ou l'ensemble du réseau de distribution manqueraient alors de tension. Ces mesures visent à protéger les moyens d'exploitation contre les dommages physiques.

Selon l'ampleur et la cause de la panne, différents concepts de » cas noir « sont nécessaires pour le rétablissement du réseau. Si la panne n'est pas trop étendue et qu'il y a suffisamment de tension disponible dans les régions voisines du réseau, le rétablissement du réseau peut probablement se faire assez rapidement par de simples mesures de reconnexion.

Si, pour quelque raison que ce soit et que cela n'est pas possible, on procède à un démarrage au noir à l'aide de centrales électriques spécialement préparées et adaptées au démarrage au noir, dont il n'existe en que peu. En effet, la plupart des centrales ne peuvent pas démarrer sans tension externe.

L'Autriche compte environ 2 centrales capables de démarrer au noir, la Suisse 4. Il existe certes en Autriche un certain nombre d'autres petites centrales. Mais le nombre à lui seul ne dit rien sur la vitesse de rétablissement du réseau.

En effet, plus d'installations signifient en général plutôt moins de puissance et plus de travail de coordination.

Le rétablissement du réseau est régulièrement exercé sur des simulateurs. On ne sait pas à l'avance si tout fonctionnera comme prévu dans la réalité. En tout cas, les exercices réels réservent toujours des surprises plus ou moins grandes.

DUtrain exploite son propre centre de formation indépendant à Duisbourg, où sont proposés des formations et des séminaires sur les thèmes de la production, du transport et de la distribution d'énergie électrique et de gaz naturel. Le personnel d'exploitation de nombreux centres de gestion de réseaux et de centrales électriques nationaux et internationaux s'y est préparé aux événements critiques attendus.

Le 30 avril 2022, les gestionnaires de réseau de transport Amprion et TransnetBW ont effectué un exercice en conditions réelles en collaboration avec la société Schluchsewerk AG. Contrairement aux simulations virtuelles réalisées jusqu'à présent, une partie du réseau réel a été déconnectée, débranchée, puis reconstruite. Amprion écrit : » Les perturbations graves sont rares. Le système est conçu de telle sorte que même en cas d'erreur il n'y a pas de restrictions pour les clients finaux. Néanmoins, le réseau de transport peut théoriquement atteindre ses limites techniques ce qui entraînerait dans le pire des cas un black-out européen. Dans ce cas improbable, l'ensemble du réseau de transmission est hors tension et le courant ne

circule pas. Avant que les clients finaux puissent à nouveau être approvisionnés, le réseau de transport doit être mis sous tension progressivement »<sup>78</sup>.

Cet exercice a été préparé sur une période de quatre ans. Sous la direction du projet d'Amprion, des planifications détaillées ont été élaborées et coordonnées. La chaire de systèmes énergétiques et de gestion de l'énergie de l'université technique de Kaiserslautern a notamment apporté son soutien pour la mise en place de dispositifs de mesure permettant de mesurer le réseau dans tous les domaines pendant la transformation. » Un tel dispositif expérimental n'existait pas jusqu'à présent en Allemagne, l'effort de mesure était le plus important de ce type ». Les données obtenues sont maintenant évaluées et traitées en collaboration avec la chaire des systèmes énergétiques électriques de l'université de Duisburg-Essen. Tout cela ne serait pas fait et financé s'il n'y avait pas un besoin concret. De nombreux concepts de récupération reposent sur des hypothèses issues de l'ancien monde de l'énergie qui ne peuvent guère suivre le rythme des changements et de la complexité croissants. C'est notamment le cas des fermetures massives de centrales en Allemagne qui, même en cas de séparation du réseau (« System Split ») comme le 8 janvier ou le 24 juillet 2021, peuvent conduire à des états de système non maîtrisables. Si par exemple il n'y a pas assez de masse tournante dans un segment partiel pour pouvoir absorber les sauts de charge qui se produisent lors de l'arrêt ou même lors du redémarrage.

Il y a peut-être des experts qui pensent qu'un tel événement est totalement impossible. Et jusqu'à présent, les experts ont trouvé des causes et des explications pour toutes les pannes d'électricité vécues après l'incident en question. Or, certaines causes étaient connues d'avance. Mais on n'a pas toujours fait quelque chose pour y remédier.

Dans l'espace germanophone, deux incidents sont restés dans les mémoires et influencent les images que nous avons en tête: la panne d'électricité à grande échelle dans le Münsterland le premier week-end de l'Avent 2005, causée par un événement météorologique, et la panne d'électricité du samedi 4 novembre 2006 vers 22h10 qui a plongé dans le noir une partie de l'Allemagne, de la France, de la Belgique, de l'Italie, de l'Autriche, de l'Espagne et qui a même eu des répercussions au Maroc.<sup>79</sup>

Dans le premier cas, il s'agissait surtout de forces naturelles, dans le second cas d'une réaction en chaîne déclenchée techniquement par une erreur humaine, dont la cause a été établie par la suite [cf. ministère de l'Intérieur du Bade-Wurtemberg (2010)].

En novembre 2004 (!), des experts avaient déjà étudié le thème d'une » situation météorologique hivernale extrême avec une panne de courant à grande échelle ». Lors du premier exercice de gestion de crise interministérielle et inter-pays (LÜKEX) qui a duré trois jours, c'était le principal sujet d'étude. Le thème de l'exercice » Panne d'électricité « a été choisi en référence à l'ouragan » Lothar« qui avait provoqué des coupures de courant de plusieurs jours en Suisse en 1999.

Le Livre vert du Forum du futur sur la sécurité publique (ZOES) de 2008 décrit différents risques, dont le scénario » Panne de courant en Allemagne « dans le troisième chapitre [voir Reichenbach (2008)]. En 2008, le Bureau d'évaluation des conséquences techniques auprès du Bundestag allemand (TAB) a été chargé d'analyser systématiquement les conséquences d'une panne de courant de grande ampleur et de longue durée. Il s'agissait de décrire les possibilités et les limites du système national de gestion des catastrophes pour faire face à une telle situation de sinistre majeur suprarégional [cf. Petermann et al. (2010)].

Le rapport final présenté en novembre 2010 décrit la vulnérabilité des technologies de l'information et des télécommunications, des transports et de la circulation, de l'approvisionnement en énergie et du système de santé.

En 2019, l'Office fédéral allemand de la protection de la population et de l'aide en cas de catastrophe a publié les résultats d'un projet de recherche intitulé » Szenariorientierte Grundlagen und innovative Methoden zur Reduzierung des Ausfallrisikos der Stromversorgung unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Bevölkerung « [Principes de base basés sur des scénarios et méthodes innovantes pour réduire le risque de défaillance de l'approvisionnement en électricité en tenant compte de l'impact sur la population] (GRASB).<sup>80</sup> Ce projet avait examiné ce qui pouvait être fait, en plus des mesures existantes des exploitants d'infrastructures énergétiques critiques et des autorités, pour réduire le risque de défaillance de l'ap-

---

<sup>78</sup> Cf. Reconstruction du réseau dans le sud de l'Allemagne - Réseaux de démarrage en test pratique. <https://www.amprion.net/Netzjournal/Beiträge-2022/Hochfahrnetze-im-Praxistest.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>79</sup> Cf. Pannes de courant historiques. <https://www.saurugg.net/hintergrundthemen/#sowohl-als-auch>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>80</sup> Cf. <https://www.sifo.de/sifo/de/projekte/schutz-kritischer-infrastrukturen/schutz-vor-ausfall-von-versorgungsinfrastrukturen/grasb/grasb-szenariorientierte-gru-wirkungen-auf-die-bevoelkerung.html>. Consulté le 01.10.2023.

provisionnement en électricité. L'aspect de la prévention de la part de la protection de la population a ainsi été mis en avant. Mais une fois de plus, cela est arrivé presque exclusivement au niveau technique.

D'autres études ont examiné les pannes de courant et les conséquences possibles dans différents contextes, par exemple : TankNotStrom (alimentation en carburant des groupes électrogènes de secours et le concept des » îles lumineuses « ou des » phares de catastrophe « )<sup>81</sup>, SIMKAS-3D (effets de cascade entre différentes infrastructures d'approvisionnement).<sup>82</sup>

Personne ne devrait donc dire qu'un blackout est un événement totalement impensable. C'est comme la pandémie qui a pu bouleverser notre vie en quelques jours. Elle non plus n'était pas inconnue des experts jusqu'en mars 2020. Seulement pour de nombreux décideurs et la population, elle semblait inimaginable. Elle s'inscrit donc dans la lignée d'événements tels que la reprise d'une guerre conventionnelle en Europe ou la destruction d'une infrastructure centrale comme Nord Stream 1 et 2. C'est pourquoi il convient de rappeler ici l'illusion de la dinde [voir Erlhofer (2023). chapitre 2].

## 2.1 Définition du blackout

Comme il n'existe pas de définition universelle du terme, » blackout « , il est important d'en donner une pour la présente étude. Dans ce sens, l'auteur entend par blackout :

Une panne d'électricité, d'infrastructure et d'approvisionnement soudaine, suprarégionale et de longue durée, touchant au moins plusieurs États ou de grands territoires nationaux. Il ne faut pas s'attendre à une aide extérieure.<sup>83</sup>

Cette définition contredit l'utilisation inflationniste du terme dans de nombreux médias pour presque toutes les pannes de courant. Cela rend souvent difficile une discussion fondée. Dans le secteur de l'énergie également, la réflexion se limite souvent à la durée de la panne de courant, ce qui est beaucoup trop court et donc contre-productif pour la prévention nécessaire des crises.

Voir par exemple la définition du gestionnaire du réseau de transport autrichien Austrian Power Grid:<sup>84</sup>

» Par blackout, on entend une panne de courant inattendue, de grande ampleur et suprarégionale - quelle que soit sa durée « .

Les pannes de courant à grande échelle se produisent régulièrement dans différentes régions du monde. Jusqu'à présent, l'Europe a été largement épargnée par de tels événements si l'on excepte les blackouts survenus dans certaines parties de l'Allemagne/Autriche/Suisse (1976), en Italie (2003) ou en Turquie (2015).<sup>85</sup> Toutes les autres grandes pannes de courant, comme dans le Münsterland (2005), en Slovaquie (2014) ou encore le délestage à grande échelle en Europe de l'Ouest (2006), n'ont pas été de véritables blackouts car il n'y a pas eu d'effondrement du système à grande échelle au cours duquel la fréquence serait tombée complètement à zéro dans la zone concernée.

Le véritable danger ne vient donc pas de la panne d'électricité mais des interruptions d'approvisionnement qui en résultent et qui se prolongent dans tous les domaines de la vie, ce qui peut amener notre société actuelle (non préparée) au bord de l'effondrement en quelques jours. D'autant plus qu'en raison de l'ampleur de l'événement, il ne faut guère compter sur une aide extérieure à la région touchée car chacun est lui-même concerné et il n'y aura guère de ressources disponibles.

Une panne d'électricité de quelques heures seulement qui s'étendrait sur de grandes zones ou sur plusieurs États, aurait déjà le potentiel de déclencher des dommages consécutifs très graves dans la production et la logistique car ni la population ni les entreprises, ni l'État ne sont préparés à de tels événements. Ce constat a déjà été fait en 2010 dans l'étude du Bureau d'évaluation des choix technologiques » Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften - am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung « (Danger et vulnérabilité des sociétés modernes - à l'exemple d'une panne d'électricité de grande ampleur et de longue durée) :

» En raison de la pénétration presque totale des appareils électriques dans le monde de la vie et du travail, les conséquences d'une panne de courant de longue durée et de grande ampleur s'additionneraient pour former une situa-

<sup>81</sup> Cf. <https://www.sifo.de/sifo/de/projekte/schutz-kritischer-infrastrukturen/schutz-vor-ausfall-von-versorgungsinfrastrukturen/tanknotstrom/tanknotstrom-energie-und-kraft-romaggregaten-bei-stromausfall.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>82</sup> Cf. [https://www.sifo.de/sifo/de/projekte/schutz-kritischer-infrastrukturen/schutz-vor-ausfall-von-versorgungsinfrastrukturen/simkas-3d/simkas-3d\\_node.html](https://www.sifo.de/sifo/de/projekte/schutz-kritischer-infrastrukturen/schutz-vor-ausfall-von-versorgungsinfrastrukturen/simkas-3d/simkas-3d_node.html). Consulté le 01.10.2023.

<sup>83</sup> D'après le rapport scientifique Energiezelle F. [www.saurugg.net/ezf](http://www.saurugg.net/ezf). Consulté le 01.10.2023.

<sup>84</sup> Cf. Austrian Power Grid : Sichere Stromversorgung, FAQ. <https://www.apg.at/stromnetz/sichere-stromversorgung>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>85</sup> Cf. Pannes de courant historiques. <https://www.saurugg.net/hintergrundthemen/#sowohl-als-auch>. Consulté le 01.10.2023.

tion de sinistre d'une qualité particulière. Toutes les infrastructures critiques seraient touchées et un effondrement de toute la société serait difficilement évitable. Malgré ce potentiel de danger et de catastrophe, la société n'est que partiellement consciente des risques. [Petermann et al. (2010). p. 4.] » Les analyses d'impact ont montré qu'après quelques jours déjà, l'approvisionnement de la population en biens et services (vitaux) sur l'ensemble du territoire et en fonction des besoins ne peut plus être assuré. [Petermann et al. (2010). p. 15.]

La vulnérabilité de la société s'est certainement accrue au cours des dix dernières années. Le degré de prévoyance a eu tendance à baisser pendant cette période car de nombreuses entreprises ou l'État lui-même, pour des raisons de gestion, se sont débarrassés de leurs réserves. Les niveaux de repli, les réserves et les stocks ont été volontiers économisés en tant que » capital mort «. Ce n'est que de cette manière qu'un éventuel blackout devient vraiment une menace réelle et sous-estimée pour la société.

### 2.1.1 Situation de pénurie d'électricité

Une situation de pénurie d'électricité est considérée comme plus probable par les experts. Cela signifie qu'une pénurie massive de couverture se profile déjà à l'avance. Selon la région et le problème, cela peut s'annoncer à très court terme, des heures ou des jours à l'avance. En Suisse, on s'attend plutôt à un délai plus long mais aussi à une situation de pénurie pouvant durer des semaines.

Si les besoins ne peuvent pas être suffisamment réduits, une gestion de la pénurie d'électricité doit être mise en place sous forme de coupures préventives de consommateurs (» brownout «) afin d'éviter une panne imprévue à grande échelle. Dans le meilleur des cas, cela ne concerne que les gros consommateurs qui se sont déclarés prêts à le faire par contrat et qui reçoivent une rémunération pour cela. Si cela ne devait pas suffire, des déconnexions roulantes à grande échelle pourraient également s'avérer nécessaires, comme par exemple au Kosovo<sup>86</sup> ou en Turquie<sup>87</sup> durant l'hiver 2021/22.

Ces dernières années, la Belgique<sup>88</sup> ou la France<sup>89</sup> ont également procédé à des préparatifs dans ce sens mais ils n'ont pas dû être utilisés jusqu'à présent. En Suisse aussi, de nombreuses entreprises ont été mises en garde contre un éventuel rationnement durant l'hiver 2021/22.<sup>90</sup>

Peu d'entreprises et de gestionnaires d'infrastructures européens seraient aujourd'hui préparés à une telle situation.

Comme en cas de blackout, il faudrait s'attendre à des dommages et des perturbations considérables dans d'autres secteurs de l'infrastructure et donc dans l'ensemble de la logistique. Ici aussi, les multiples interactions et interdépendances sont souvent sous-estimées, comme cela avait déjà été mis en garde dans le cadre de l'exercice du réseau national de sécurité suisse en 2014 :

» Ce n'est pas la panne d'électricité mais la pénurie prolongée d'électricité qui se dessine comme le plus grand défi dans le scénario de la RSE 14. Une panne totale de certaines infrastructures critiques est très probable car moins de courant ne signifie souvent pas moins de choses mais plutôt que rien ne fonctionne. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) commandent des systèmes importants (transport, téléphonie, gestion des stocks, trafic des paiements, etc.) Aujourd'hui, rien ne va plus sans les TIC mais sans électricité, les TIC ne vont pas. Dans cette situation, le diesel ou d'autres carburants sont indispensables pour remplacer la production locale d'électricité. Le maintien de l'approvisionnement de base de la population en biens d'usage et de consommation devient très vite central et très difficilement réalisable. Comme les voies de communication habituelles sont en outre très limitées, une situation de pénurie d'électricité de longue durée ne doit pas être sous-estimée mais constitue une tâche herculéenne pour toutes les personnes concernées «<sup>91</sup>.

Une situation de pénurie d'électricité prolongée pourrait également résulter d'un blackout lorsque des moyens d'exploitation sont endommagés et que les capacités de production et/ou de transport ne sont plus disponibles pendant une période pro-

<sup>86</sup> Cf. [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_historischer\\_Stromausf%C3%A4lle](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_historischer_Stromausf%C3%A4lle). Consulté le 01.10.2023.

<sup>87</sup> Cf. <https://www.handelsblatt.com/politik/international/erdgasmangel-es-herrscht-panik-tuerkische-regierung-schaltet-der-industrie-im-land-den-strom-ab/28001710.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>88</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/?s=belgien>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>89</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/?s=frankreich>. Consulté le 01.10.2023

<sup>90</sup> Cf. <https://www.ostral.ch/de>. Consulté le 01.10.2023

<sup>91</sup> Cf. SVU'14 – Newsletter Juni. <https://www.saurugg.net/2014/blog/newsletter/svu14-newsletter-juni>. Consulté le 01.10.2023.

longée. En Suisse, un tel scénario est considéré depuis 2012 déjà comme le risque le plus probable et le plus grave pour le pays.<sup>92</sup>

## 2.2 Conséquences et durée d'un blackout

Une perturbation majeure à l'échelle européenne et transnationale entraînerait immédiatement une panne à grande échelle de la plupart des infrastructures critiques (KRITIS, KRITIS est l'abréviation de « Kritische Infrastrukturen » = infrastructures critiques. L'accent est mis ici sur les installations et les organisations dont la défaillance a des conséquences durables pour la nation. Ces conséquences peuvent être des pénuries d'approvisionnement, des perturbations de la sécurité publique ou d'autres perturbations importantes.) [cf. Petermann et al. (2010), Reichl et al. (2015), Erlhofer (2023)]. Cela commencerait par les télécommunications (téléphonie mobile, réseau fixe, Internet), ce qui entraînerait, outre l'électricité, la défaillance des deux principales artères vitales de notre société moderne. Par la suite, pratiquement toutes les prestations d'approvisionnement seraient interrompues ou ne seraient plus disponibles que de manière très limitée : le système financier (distributeurs automatiques de billets, caisses, trafic d'argent et de paiement), le trafic (feux de signalisation, tunnels, chemins de fer, stations-service) et donc toute la logistique d'approvisionnement (denrées alimentaires, médicaments, marchandises de toutes sortes), jusqu'aux pannes régionales ou à grande échelle de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux usées.

Sans parler des dizaines de milliers de personnes qui pourraient se retrouver bloquées dans les ascenseurs, les trains ou, en hiver, les remontées mécaniques. Les habitants des immeubles qui ne sont pas entièrement mobiles ne pourraient plus atteindre ou quitter leur logement.

La vie quotidienne s'arrêterait d'un moment à l'autre.

Une panne à grande échelle de l'infrastructure de télécommunication, due par exemple à une cyberattaque ou à un tremblement de terre, pourrait avoir des conséquences tout aussi importantes. Une pandémie aggravée, dans laquelle un nombre nettement plus élevé de personnes tomberaient malades en même temps, entraînerait également des interruptions et des pénuries d'approvisionnement massives. Notre logistique en flux tendu, hautement optimisée et plus efficace, ne dispose plus guère de réserves ou de niveaux de repli correspondants pour pouvoir compenser les importantes pertes d'infrastructure ou de personnel auxquelles il faut s'attendre.

La fragilité des chaînes logistiques [voir CSH (2020)] a pu être observée à plusieurs reprises en 2021. Dans le cas d'un blackout qui paralyserait simultanément une grande partie de l'Europe, les conséquences seraient bien plus graves. Il faut donc s'attendre à un effet de choc global et à de longs délais de remise en service.

### 2.2.1 Phase 1 - panne totale d'électricité et d'infrastructure

Un blackout peut être divisé en trois phases principales : En Autriche, on s'attend à une coupure de courant d'environ 24 heures.<sup>93</sup> Certaines parties de l'approvisionnement régional en électricité peuvent probablement être rétablies beaucoup plus rapidement. Dans d'autres parties, cela peut prendre plus de temps. Les zones urbaines doivent être réalimentées en priorité.

L'Autriche dispose d'un grand avantage par rapport à de nombreux autres pays en ce qui concerne le rétablissement du réseau grâce à ses deux grandes centrales de pompage-turbinage pouvant être démarrées et réglées. Cela permettrait de rétablir le réseau beaucoup plus rapidement que dans de nombreux autres pays.

Au niveau européen, on estime qu'il faudra jusqu'à une semaine, selon le scénario de la panne, pour rétablir un approvisionnement en électricité stable partout. Une panne d'électricité à grande échelle pendant plusieurs semaines aurait toutefois des conséquences catastrophiques pour la région concernée, comme l'avait déjà averti en 2010 le Bureau d'évaluation des conséquences techniques auprès du Bundestag allemand :

» Au plus tard à la fin de la première semaine, il faudrait s'attendre à une catastrophe, c'est-à-dire à des dommages pour la santé ou à la mort de très nombreuses personnes ainsi qu'à une situation problématique impossible à maîtriser.

<sup>92</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/?s=risikobericht+schweiz>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>93</sup> Cf. risque de « blackout » : la prévention des pannes de courant est renforcée en Autriche. <https://www.tt.com/artikel/30802053/blackout-gefahr-stromausfall-vorsorge-in-oesterreich-wird-verstaerkt>. Consulté le 01.10.2023

ser avec les moyens et les capacités en personnel disponibles au niveau local ou régional ». [Petermann (2010). S. 10.]

Les estimations concernant la durée de la catastrophe (quelques heures, quelques jours ou même quelques semaines) divergent fortement et sont liées à de nombreuses incertitudes.

Dans tous les cas, la durée effective dépend essentiellement de l'événement déclencheur et de la taille de la zone en panne.

Si une tension suffisante peut être transférée depuis des zones de réseau voisines non défaillantes, le rétablissement peut être nettement plus rapide. Si l'infrastructure a été endommagée ou même sabotée pendant la panne, cela peut aussi prendre beaucoup plus de temps. Si la puissance de la centrale n'est pas suffisante après le redémarrage, une gestion de la pénurie d'électricité peut également s'avérer nécessaire. Il existe donc de nombreux facteurs d'incertitude.

De nombreuses autres infrastructures ne devraient être reconnectées au réseau électrique que lorsque l'approvisionnement en électricité est suffisamment stable et fiable. Dans le cas contraire, les variations de tension, de courant et de fréquence peuvent entraîner des dommages supplémentaires aux installations et aux infrastructures. C'est pourquoi il convient d'attendre le plus longtemps possible avant de remettre en service le réseau jusqu'à ce qu'il soit clairement communiqué que le système d'interconnexion européen fonctionne à nouveau de manière suffisamment stable et qu'il n'y a pas de risque de nouvelle panne indirecte. Ceci d'autant plus qu'il existe des expériences issues de l'entraînement au rétablissement du réseau basé sur la simulation qui montrent que des pannes totales se produisent régulièrement lors de l'interconnexion de réseaux partiels.

En cas de panne de courant, des groupes électrogènes de secours sont conservés dans différents secteurs critiques. Mais là aussi, il s'avère que la performance et la fiabilité sont souvent surestimées,<sup>94</sup> ce qui a été démontré par exemple lors de la panne de courant de 31 heures à Berlin-Köpenick en février 2019 où le groupe électrogène de secours de la clinique DRK est tombé en panne après 7 heures de fonctionnement de secours. Vingt-trois patients en soins intensifs ont dû être évacués.<sup>95</sup> En cas de blackout, cela ne serait pas possible.

Dans le livre blanc Netz-und-Versorgungswiederaufbau-2030 (Rétablissement du réseau et de l'alimentation 2030 / Grid and Supply Reconstruction), les gestionnaires de réseau de transport (GRT) allemands décrivent que

» Selon une évaluation des risques effectuée par les GRT (...) en raison des changements dans le portefeuille de production, de la décentralisation de la et de la disparition des grandes centrales thermiques, la reconstruction du réseau devient plus petite et plus complexe, ce qui a un effet négatif sur la durée prévue de la reconstruction du réseau et de l'approvisionnement. C'est la raison pour laquelle l'article 41 du règlement ER a porté à 72 h la durée minimale de 24 heures de résistance au noir en Allemagne. Les GRT suivent ainsi une recommandation de l'Office fédéral pour la protection de la population et l'aide en cas de catastrophe (BBK) pour les exploitants d'infrastructures critiques «<sup>96</sup>.

Ils indiquent néanmoins qu'il sera possible

»... selon toute probabilité, il ne sera pas possible de raccorder une part prépondérante des petites DEA de manière résistante aux chutes noires pendant 72 h «.

Les GRT ne sont donc absolument pas certains de pouvoir rétablir complètement le réseau d'approvisionnement en l'espace de trois jours. Ils décrivent dès 2020 dans leurs » Betrachtungen zum Netz- und Versorgungswiederaufbau « (Considérations sur le rétablissement du réseau et de l'approvisionnement):

» Pour la durée du rétablissement du réseau, cela signifie qu'aujourd'hui comme à l'avenir, les GRT feront avancer aussi rapidement que possible l'achèvement du paquet de mesures 'Rétablissement du réseau des GRT' «.

<sup>94</sup> Cf. tout ce qui peut aller de travers et qui va de travers. <https://www.saurugg.net/blackout/auswirkungen-eines-blackouts/was-so-alles-schief-gehen-kann-und-geht>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>95</sup> Cf. <https://www.ostral.ch/de>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>96</sup> Livre blanc\_NWA\_VWA\_2030. <https://www.netztransparenz.de/Weitere-Veroeffentlichungen/Wei%C3%9Fbuch-Netz-und-Versorgungswiederaufbau-2030>. Consulté le 01.10.2023

Il conviendra toutefois de vérifier en permanence si le délai de 24 heures voire de 72 heures en perspective, pourra être respecté à l'avenir compte tenu de l'évolution des conditions générales.<sup>97</sup>

Mais tous les groupes électrogènes de secours ne se comportent pas comme prévu. La qualité du carburant des groupes électrogènes de secours est un problème fréquent, comme l'a montré une enquête allemande de 2014. A l'époque, environ 60 % du carburant analysé était défectueux ou de mauvaise qualité. Seuls 6 % étaient irréprochables.<sup>98</sup>

De manière générale, il s'avère qu'une alimentation de secours devrait également être testée régulièrement sur une longue période afin de pouvoir réellement partir du principe qu'elle fonctionnera sans problème en cas de besoin.<sup>99</sup> Il existe trop de sources d'erreurs potentielles.

### Phases d'une panne d'électricité, d'infrastructure et d'approvisionnement à l'échelle européenne

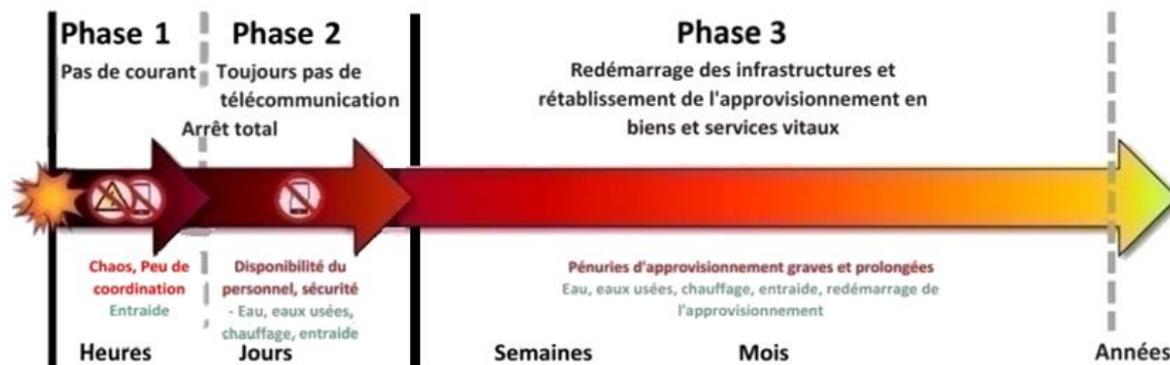


Fig. 1 : Phases d'un blackout

#### 2.2.2 Phase 2

Jusqu'à présent, de nombreux préparatifs se sont concentrés exclusivement sur cette phase 1 de la panne de courant, ce qui est nettement insuffisant.

La phase 2, jusqu'à ce que l'approvisionnement en télécommunications avec le réseau fixe, la téléphonie mobile et Internet fonctionne à nouveau de manière stable après la panne de courant, est totalement sous-estimée. Il faut s'attendre à de graves pannes matérielles et à des perturbations ainsi qu'à des surcharges massives lors du redémarrage, ce qui signifie qu'il faut compter avec un temps de rétablissement d'au moins plusieurs jours. Plus la coupure de courant est longue, plus il faut s'attendre à des dommages graves en particulier dans les systèmes backbone.

Dans les régions où la panne de courant dure plus de 48-72 heures, le temps de rétablissement de ces infrastructures centrales est difficilement calculable car la plupart des installations d'alimentation de secours seront généralement tombées en panne d'ici là. Il faut alors s'attendre à des dommages importants sur les composants informatiques.

Le problème principal est celui des condensateurs électrolytiques desséchés. Cela ne se remarque pas en fonctionnement. Mais si le courant est coupé, ce composant est détruit lors de la remise sous tension, ce qui entraîne la défaillance de l'ensemble du composant.

Il faut s'attendre à ce que cela entraîne un problème de pièces de rechange, étant donné qu'un remplacement externe à court terme ne sera guère possible en raison du manque de possibilités de communication et des exigences élevées en matière de simultanéité.

<sup>97</sup> Betrachtungen zum Netz- und Versorgungswiederaufbau, partie du rapport des gestionnaires de réseau de transport allemands conformément au § 34 (1) KVVG, Bayreuth, Berlin, Dortmund, Stuttgart 22.12.2020.  
[https://www.netztransparenz.de/portals/1/20201222%20UeNB%20Bericht\\_%C2%A7%2034%20KVVG.pdf](https://www.netztransparenz.de/portals/1/20201222%20UeNB%20Bericht_%C2%A7%2034%20KVVG.pdf). Consulté le 01.10.2023.

<sup>98</sup> Cf. nouvelles connaissances sur la capacité de stockage des combustibles pour les installations de remplacement du réseau.  
<https://www.saurugg.net/2015/blog/stromversorgung/neue-erkenntnisse-zur-lagerfaehigkeit-von-brennstoffen-fuer-netzersatzanlagen>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>99</sup> Cf. Prévention du blackout : le diable se cache dans les détails. <https://www.saurugg.net/2020/blog/krisenvorsorge/blackout-vorsorge-der-teufel-steckt-im-detail>. Consulté le 01.10.2023.

De telles pannes et perturbations peuvent survenir dans n'importe quelle infrastructure, en particulier si celle-ci n'est jamais coupée, ce qui concerne également l'ensemble du système de gestion des bâtiments. Si une déconnexion complète et régulière était effectuée, ces défauts seraient régulièrement remarqués et pourraient être corrigés à temps. Dans de nombreuses installations complexes, il n'est toutefois plus possible de couper l'alimentation. C'est pourquoi les problèmes prévisibles s'y accumulent et prennent alors effet simultanément.<sup>100</sup> Une évolution fatale.

Or, sans approvisionnement en télécommunications, ni les chaînes de production, ni la logistique, ni la logistique des carburants ne fonctionnent, et donc pas non plus l'approvisionnement de la population en biens et services vitaux.

Les services de santé (hôpitaux, médecins, pharmacies, soins, etc.) ne fonctionneront que de manière limitée voire pas du tout. Les hôpitaux disposent certes d'une alimentation électrique de secours. Mais celle-ci ne peut souvent alimenter que les secteurs les plus importants. D'autre part, il existe une très grande dépendance vis-à-vis des services d'approvisionnement et d'évacuation externes, de sorte que les soins médicaux ne seront rapidement plus possibles que de manière très limitée. La disponibilité du personnel sera particulièrement critique [voir Petermann et al. (2010)].

Parallèlement, l'étude » Ernährungsvorsorge in Österreich « (Prévention nutritionnelle en Autriche) [cf. Kleb et al. (2015)] ainsi que des études comparables menées en Allemagne arrivent à la conclusion qu'au plus tard le quatrième jour d'une interruption de l'approvisionnement due au blackout, environ un tiers de la population ne se sent plus en mesure de subvenir suffisamment à ses besoins. Au bout de sept jours, près des deux tiers soit environ six millions de personnes en Autriche, pourraient déjà être concernés.

Les touristes ou les navetteurs qui auront dans tous les cas besoin d'une aide extérieure, ne sont pas encore pris en compte.

Il n'existe aucun dispositif étatique ou autre permettant de faire face à un événement d'une telle ampleur. Les secouristes et leurs familles sont également directement touchés par les conséquences.

Ce n'est que l'enchaînement de toutes ces conséquences qui conduit à une véritable catastrophe.

Certes, il existe depuis toujours des recommandations selon lesquelles la population devrait constituer des réserves personnelles d'urgence mais cette pratique a été abandonnée dans une grande partie de l'Europe centrale au plus tard après la fin de la guerre froide, il y a plus de 30 ans. C'est la malédiction de la très grande sécurité d'approvisionnement dans tous les domaines de la vie, qu'il s'agisse de l'électricité, de l'eau, des denrées alimentaires ou de la santé : il y a toujours quelque chose, et s'il y a un problème, quelqu'un est rapidement sur place pour aider.<sup>101</sup> En cas de blackout, cela ne fonctionnera pas.

C'est pourquoi les recommandations de prévention telles que » Guter Rat – Notvorrat « (Bon conseil - Réserve d'urgence) en Suisse<sup>102</sup>, les recommandations de l'Office fédéral allemand de la protection de la population et de l'aide en cas de catastrophe (BBK)<sup>103</sup> ou de l'Association autrichienne de protection civile<sup>104</sup> sont plus actuelles que jamais. Elles ne parviennent que rarement à la population en général.

La Gesellschaft für Krisenvorsorge (GfKV - La société de prévention des crises)<sup>105</sup> tente donc, avec l'initiative » Mach mit ! Österreich wird krisenfit ! « (» Participe à la campagne ! L'Autriche se prépare à la crise ! « )<sup>106</sup> ou » Schritt für Schritt krisenfit « ( » Pas à pas en forme pour la crise ! « )<sup>107</sup>, afin de rendre ce thème accessible à la société et de le faire sortir de sa niche.

L'un des problèmes fondamentaux réside certainement dans l'insuffisance de la communication sur les risques et la sécurité pour faire comprendre à la population la nécessité de la prévention. Et ce, non pas seulement lorsqu'une crise s'est déjà produite mais bien avant. C'est pourquoi, dans les situations de crise réelles, on assiste rapidement à des réactions excessives

<sup>100</sup> Cf. panne de courant dans la maison de la radio MDR à Halle. <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/halle/halle/funkhaus-halle-stromausfall-100.html>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>101</sup> Cf. les risques au quotidien : Une étude internationale révèle une faible compétence en matière de risques au sein de la population. [https://www.ots.at/presseaussendung/OTS\\_20230915\\_OT0107/alltagsrisiken-internationale-studie-zeigt-geringe-risikokompetenz-in-der-bevoelkerung-bild](https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20230915_OT0107/alltagsrisiken-internationale-studie-zeigt-geringe-risikokompetenz-in-der-bevoelkerung-bild). Consulté le 01.10.2023.

<sup>102</sup> Cf. <https://blog.alertswiss.ch/de/rubriken/vorsorge/notvorrat/>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>103</sup> Cf. [https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/warnung-vorsorge\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/warnung-vorsorge_node.html). Consulté le 01.10.2023.

<sup>104</sup> Cf. <http://zivilschutzverband.at/de/aktuelles/33/Bevorratung-Checkliste>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>105</sup> <https://gfkv.org>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>106</sup> <https://www.krisenfit.jetzt>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>107</sup> <https://www.schritt-fuer-schritt-krisenfit.de>. Consulté le 01.10.2023.

comme par exemple avant le premier lockdown en 2020 avec l'achat excessif de papier toilette ou de comprimés d'iodure de potassium en mars 2022.

La société manque d'une maturité générale face aux risques et d'une aptitude à gérer les crises pour pouvoir faire face à des événements exceptionnels.<sup>108</sup> Heureusement, cela n'a pas été vraiment nécessaire pendant des décennies mais il semble que cela devienne de plus en plus une nécessité aujourd'hui.

### 2.2.3 Phase 3

Même si le courant est rétabli et que les télécommunications fonctionnent à nouveau, la crise est loin d'être terminée. La phase 3 qui s'ensuit durera des semaines, des mois voire des années, selon le secteur concerné. Par exemple, dans l'agriculture industrialisée, on peut s'attendre à ce que des millions d'animaux meurent en quelques heures en Europe.<sup>109,110</sup>

Des pénuries d'approvisionnement prolongées sont donc très probables car une perte de production qui peut également affecter la production de légumes, ne peut pas être facilement compensée pour des millions de personnes. A cela s'ajoutent les nombreuses dépendances transnationales dans la logistique d'approvisionnement.

Les matériaux d'emballage, entre autres, pourraient constituer un goulot d'étranglement particulier. Si ceux-ci ne sont pas disponibles, par exemple en raison de graves pertes de production, les produits ne peuvent plus être emballés et mis en circulation comme d'habitude.

La panne à grande échelle des appareils de réfrigération dans de nombreux supermarchés aurait d'énormes conséquences sur l'approvisionnement en produits à réfrigérer.

Dans notre logistique en flux tendu hautement optimisée, il existe une multitude de possibilités pour lesquelles l'ensemble de la chaîne pourrait s'enrayer ou même tomber en panne. Le Complexity Science Hub (CSH) autrichien de Vienne a lancé une mise en garde à ce sujet au début de la pandémie de coronavirus. L'effondrement de secteurs entiers est possible si certains maillons de la chaîne tombent en panne [voir CSH (2020)]. La guerre en Ukraine a été jugée de manière tout aussi critique [cf. CSH (2022)], même si de graves perturbations n'ont pas encore eu lieu.

Les temps de rétablissement attendus seront donc nettement plus longs que ce que beaucoup ont prévu jusqu'à présent. Ainsi, le redémarrage de nombreux domaines d'activité ne sera possible que lorsque l'approvisionnement de base en denrées alimentaires sera à nouveau assuré.

Les temps de rétablissement attendus seront donc nettement plus longs que ce que beaucoup pensaient jusqu'à présent. Ainsi, le redémarrage de nombreux secteurs d'activité ne sera possible que lorsque l'approvisionnement de base en denrées alimentaires sera à nouveau assuré.

## 2.3 Que peut-on faire?

A court terme, seule la préparation à un tel événement potentiel semble judicieuse, ce qui est également valable en général : la prévention, la protection et la sécurité sont importantes mais pas suffisantes. Ici aussi, nous avons besoin d'une pensée « à la fois » : Nous devons être en mesure de faire face à des événements inattendus [voir Weik (20102)] et de les maîtriser. Cela concerne tous les niveaux et tous les domaines. Par exemple, la prévention des cyber-attaques est extrêmement importante mais un plan d'urgence et de récupération est indispensable même si l'on espère toujours ne jamais en avoir besoin. De même que dans le domaine informatique, seule une bonne stratégie de sauvegarde protège contre les pertes de données, des réserves soigneusement planifiées et constituées à tous les niveaux sont indispensables pour faire face aux pannes à grande échelle attendues en cas de blackout.

L'espoir seul ne suffit pas. Nous menons la plus grande transformation d'infrastructure de tous les temps à cœur ouvert et sans réseau de sécurité. Cela pourrait s'avérer être une erreur fatale.

<sup>108</sup> Cf. les risques au quotidien : Une étude internationale révèle une faible compétence en matière de risques au sein de la population.

[https://www.ots.at/presseaussendung/OTS\\_20230915\\_OTS0107/alltagsrisiken-internationale-studie-zeigt-geringe-risikokompetenz-in-der-bevoelkerung-bild](https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20230915_OTS0107/alltagsrisiken-internationale-studie-zeigt-geringe-risikokompetenz-in-der-bevoelkerung-bild). Consulté le 01.10.2023.

<sup>109</sup> Cf. SRF-Blackout Thementag - Résumé - Agriculture. <https://www.saurugg.net/2017/blog/stromversorgung/srf-blackout-thementag-zusammenfassung>. Consulté le 01.10.2023.

<sup>110</sup> Cf. les effets d'une panne d'électricité étendue et prolongée sur les animaux d'élevage en stabulation.

<https://www.saurugg.net/2021/blog/krisenvorsorge/auswirkungen-eines-grossflaechigen-und-langandauernden-stromausfalls-auf-nutztiere-in-stallhaltungen>. Consulté le 01.10.2023.

L'étape la plus importante commence entre les quatre murs de la maison : Pouvoir subvenir à ses besoins et à ceux de sa famille pendant au moins 14 jours en faisant des réserves. Cela implique au moins deux litres d'eau par personne et par jour pendant plusieurs jours (phases 1 et 2). Après la coupure de courant, il est possible de cuisiner mais pas de faire les courses. Les denrées alimentaires telles que les nouilles, le riz ou les conserves sont donc nécessaires en plus des réserves déjà existantes pour 14 jours. Il en va de même pour les médicaments importants, les aliments pour bébés et pour les animaux domestiques. Des lampes de poche, une radio à piles, des sacs poubelles et d'autres ustensiles sont importants. Tout simplement tout ce que l'on emporterait pour deux semaines de camping [voir Erlhofer (2023). p. 657 et suivantes].<sup>111</sup>

Cette prévoyance de base est essentielle pour que la production et la logistique puissent redémarrer le plus rapidement possible. En effet, si les gens ne peuvent plus s'approvisionner eux-mêmes, ils ne viendront plus travailler pour remettre en route la production et les systèmes. Une large prévoyance personnelle au sein de la population (= personnel) est donc une condition essentielle pour pouvoir gérer au mieux un tel scénario. Cela vaut en particulier pour les organisations et les entreprises qui doivent maintenir une exploitation d'urgence dans un tel cas, donc aussi pour le secteur de l'énergie. D'autre part, personne ne peut aider des millions de personnes s'il est lui-même touché.

### 2.3.1 Mesures organisationnelles

Les mesures organisationnelles nécessaires peuvent être prises sur la base de la prévention individuelle. La première étape consiste à sensibiliser son propre personnel afin d'initier la prévention individuelle. Ensuite, il faut réfléchir à la manière dont la communication nécessaire peut être assurée en cas de blackout. Cela n'est souvent possible que grâce à des plans hors ligne, c'est-à-dire des accords préparés à l'avance, disponibles sous forme écrite et qui doivent être présents dans l'esprit des collaborateurs. Le personnel clé doit savoir ce qu'il faut faire si personne n'est plus joignable ou comment fonctionnent la relève et l'approvisionnement si un service d'urgence doit être maintenu.

L'alerte, telle qu'elle est habituellement donnée, ne fonctionnera généralement pas car la plupart des systèmes de télécommunication tomberont en panne dans les minutes qui suivent une coupure de courant. En ce qui concerne la disponibilité du personnel, il convient de tenir compte de circonstances personnelles telles que l'éloignement du lieu de travail ou d'autres obligations telles que la prise en charge de personnes nécessitant des soins, des fonctions dans des cellules de crise communales ou des organisations d'intervention. En outre, il faut déterminer combien de temps les ressources disponibles, par exemple la quantité de carburant pour les groupes électrogènes de secours ou l'eau et les denrées alimentaires, suffiront pour un fonctionnement d'urgence car sans préparation adéquate, il ne faut guère s'attendre à un approvisionnement de l'extérieur. Cela va jusqu'aux plans de redémarrage, pour lesquels il faut réfléchir aux conditions nécessaires à la reprise d'une activité en bonne et due forme.

En règle générale, une reprise de l'activité n'est possible et judicieuse qu'en phase 3, lorsque les télécommunications sont à nouveau suffisamment garanties. En d'autres termes, lorsque les collaborateurs peuvent à nouveau être joints par téléphone. Car sans télécommunication, aucune coordination avec les clients ou les fournisseurs ne fonctionne. D'autre part, l'approvisionnement de base en denrées alimentaires doit être à nouveau assuré avant que d'autres choses ne soient à nouveau nécessaires.

## 2.4 Résumé

Une panne de courant à grande échelle est inimaginable pour de nombreuses personnes car elles n'ont jamais vécu un tel événement auparavant.

En même temps, il n'existe pas de sécurité à 100 %, surtout lorsque des changements aussi fondamentaux et souvent non systémiques ont lieu en cours de fonctionnement, comme ceux décrits dans la première section.

Une société moderne devrait donc également être en mesure de répondre à la question « et si ». Jusqu'à présent, trop de décideurs et la population se sont appuyés sur le principe de l'espoir. C'est certes important pour ne pas tomber dans le fatalisme. Mais si c'est tout ce que l'on peut opposer à un événement possible, il sera très difficile de faire face à une telle surprise potentielle.

---

<sup>111</sup> Cf. <https://www.saurugg.net/leitfaden> ou <https://blog.alertswiss.ch/de/rubriken/vorsorge/notvorrat> (Suisse) ou [https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/warnung-vorsorge\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/warnung-vorsorge_node.html) (Allemagne) ou <http://zivilschutzverband.at/de/aktuelles/33/Bevorratung-Checkliste> (Autriche). Consulté le 01.10.2023.

Les raisons en sont multiples. D'une part, il manque souvent la culture de l'erreur nécessaire pour aborder les problèmes de manière ouverte et transparente. D'autre part, le débat politique sur la nécessaire transition énergétique est souvent mené de manière idéologique, avec des œillères et peu de compréhension technique. La polarisation supplémentaire (pensée «ou bien ou bien») empêche toute discussion constructive. Du côté des professionnels, la contradiction fait souvent défaut. Que ce soit en raison de dépendances organisationnelles ou parce que l'on ne veut pas être taxé d'«éternel».

On observe des phénomènes similaires en matière de prévention des crises. Une prévention insuffisante n'est généralement admise qu'en catimini. Il y a donc souvent un grand écart entre la présentation officielle et la réalité.

Bien que l'on agisse partout de la même manière, on pense souvent que les choses doivent être meilleures dans d'autres domaines et que toutes les mesures nécessaires y ont certainement été prises. Ainsi, trop de gens se reposent sur les autres sans fondement.

Une grande partie de la population part du principe irréaliste que l'État s'occupera d'elle dans un tel cas.<sup>112</sup>

Un blackout possible et même très réaliste bouleverserait donc en très peu de temps notre société hautement technicisée et dépendante de l'électricité. Alors que lors de la pandémie de coronavirus, il y avait encore un certain temps d'avance et que toutes les prestations infrastructurelles pouvaient être maintenues, en cas de blackout, l'arrêt total survient d'un mois à l'autre. Un chaos total à court terme ne peut être atténué que par des préparatifs individuels et organisationnels appropriés.

Cela ne demande souvent qu'un effort raisonnable : une prévoyance personnelle pour au moins 14 jours et des plans de déroulement organisationnels correspondants qui fonctionnent également en grande partie sans moyens de communication techniques. En règle générale, cela permet d'éviter de nombreux dommages. Mais les connaissances ne suffisent pas. Nous devons également agir rapidement.

---

<sup>112</sup> Cf. Préparation à la crise : la population autrichienne mise sur l'État, moins sur la prévoyance individuelle. <https://viecer.univie.ac.at/corona-blog/corona-blog-beitraege/blog114>. Consulté le 01.10.2023.

### 3 Bibliographie

De nombreux auteurs ont servi de base à cette approche systémique globale : <https://www.saurugg.net/uebermich/literaturliste> De nombreuses notes de bas de page renvoient à des sources sur le site web de l'auteur ([www.saurugg.net](http://www.saurugg.net)). Le contexte est le suivant : depuis 2011, l'auteur met à disposition sur son site web des évaluations et des résumés complets qui renvoient en général à plus d'une source.

ACPP (Austrian Corona Panel Project). 2021. Krisenvorsorge: Die österreichische Bevölkerung setzt auf den Staat, weniger auf Eigenvorsorge. <https://viecer.univie.ac.at/corona-blog/corona-blog-beitraege/blog114/>. Consulté le 01.10.2023.

APCC (Austrian Panel on Climate Change). 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014. [https://austriaca.at/APCC\\_AAR2014.pdf](https://austriaca.at/APCC_AAR2014.pdf). Consulté le 01.10.2023.

BMLV (Bundesministerium für Landesverteidigung). 2019. Sicher. Und morgen? Sicherheitspolitische Jahresvorschau 2020. BMLV (Wien).

Bundesrechnungshof. 2021. Umsetzung der Energiewende im Hinblick auf die Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit bei Elektrizität. Bundesrechnungshof (Bonn).

Casti, John. 2012. Der plötzliche Kollaps von allem: Wie extreme Ereignisse unsere Zukunft zerstören können. Piper Verlag GmbH (München).

Casti, John and Jones, Roger D. and Pennock, Michael J. 2017. Confronting Complexity - X-Events, Resilience, and Human Progress. The X-Press CSH (Complexity Science Hub Vienna). 2020.

CSH (Complexity Science Hub Vienna). 2020. CSH Policy Brief: Wie robust sind die österreichischen Lieferketten? <https://www.csh.ac.at/wp-content/uploads/2020/06/CSH-Policy-Brief-Lieferkette-final.pdf>. Consulté le 01.10.2023.

CSH (Complexity Science Hub Vienna). 2022. CSH Policy Brief: How the war in Ukraine might affect global food supply. <https://www.csh.ac.at/wp-content/uploads/2022/03/CSH-Policy-Brief-2-2022-How-the-war-in-Ukraine-might-affect-global-food-supply.pdf>. Consulté le 01.10.2023.

Dueck, Gunter. 2015. Schwarmdumm: So blöd sind wir nur gemeinsam. Campus Verlag (Frankfurt am Main).

ENTSO-E. 2015. Report on Blackout in Turkey on 31st March 2015. [https://www.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Regional Groups Continental Europe/20150921 Black Out Report v10 w.pdf](https://www.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Regional%20Groups/Continental%20Europe/20150921%20Black%20Out%20Report%20v10%20w.pdf). S 46. Consulté le 01.10.2023.

Erlhofer, Peter. 2023. Blackbox Blackout – Fragen zur Komplexität von Stromausfällen – Wege zur Resilienz. Geistkirch Verlag (Saarbrücken).

Fremerey, Melinda and Obst, Thomas. 2022. Globalisierungskrise. Welche Abhängigkeiten bestehen bei kritischen Gütern und Rohstoffen aus China?, IW-Kurzbericht, Nr. 48. [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user\\_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht\\_2022-Globalisierungskrise.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht_2022-Globalisierungskrise.pdf). (Berlin). Consulté le 01.10.2023.

Grüter, Thomas. 2013. Offline!: Das unvermeidliche Ende des Internets und der Untergang der Informationsgesellschaft. Springer-Verlag (Heidelberg).

Innenministerium Baden-Württemberg. 2010. Krisenhandbuch Stromausfall Baden-Württemberg: Krisenmanagement bei einer großflächigen Unterbrechung der Stromversorgung am Beispiel Baden-Württemberg. Jedermann-Verlag (Heidelberg)

ITA (Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften) und AIT (Austrian Institute of Technology Innovation Systems Department). 2022. Sichere Stromversorgung und Blackout-Vorsorge in Österreich. Entwicklungen, Risiken und mögliche Schutzmaßnahmen. Österreichisches Parlament (Wien).

Kleb, Ulrike and Katz, Nicholas and Schinagl, Clemens and Angermann, Anna. 2015. Risiko- und Krisenmanagement für die Ernährungsvorsorge in Österreich (EV-A). [https://www.joanneum.at/fileadmin/user\\_upload/imported/uploads/tx\\_publicationlibrary/Risiko-und\\_Krisenmanagement\\_fuer\\_die\\_Ernaehrungsvorsorge\\_EV-A\\_.pdf](https://www.joanneum.at/fileadmin/user_upload/imported/uploads/tx_publicationlibrary/Risiko-und_Krisenmanagement_fuer_die_Ernaehrungsvorsorge_EV-A_.pdf). Consulté le 01.10.2023.

Meadows, Dennis and Meadows, Donella and Zahn, Erich and Milling, Peter. 1973. Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Rowohlt Taschenbuch Verlag (Hamburg).

- Meadows, Donella H. 2010. Die Grenzen des Denkens - Wie wir sie mit System erkennen und überwinden können. oekom verlag (München).
- Mukerji, Nikil and Mannino Adriano. 2020. COVID-19: Was in der Krise zählt. Über Philosophie in Echtzeit. Reclam (Ditzingen).
- Ossimitz, Günther and Lapp, Christian. 2006. Systeme: Denken und Handeln; Das Metanoia-Prinzip: Eine Einführung in systemisches Denken und Handeln. Franzbecker (Berlin).
- Qvist, Staffan and Al Hammadi, Mohamed and Victor, David G. 2023. Meeting the Challenge of Reliability on Today's Electric Grids: The Critical Role of Inertia. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2023/09/Insight-135-Meeting-the-Challenge-of-Reliability-on-Todays-Electricity-Grids.pdf>. Consulté le 01.10.2023.
- Paulitz, Henrik. 2020. Strom-Mangelwirtschaft: Warum eine Korrektur der Energiewende nötig ist. Akademie Bergstraße (Seeheim-Jugenheim).
- Palmer, Graham and Floyd, Joshua. 2020. Energy Storage and Civilization - A System Approach. Springer International (E-Book).
- Petermann, Thomas and Bradke, Harald and Lüllmann, Arne and Poetzsch, Maik and Riehm, Ulrich. 2010. Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung. Bundestag (Berlin).
- Reichenbach, Gerold. 2008. Risiken und Herausforderungen für die öffentliche Sicherheit in Deutschland, Berlin, Grünbuch des ZUKUNFTSFORUMS ÖFFENTLICHE SICHERHEIT. ProPress-Verl.-Ges. (Berlin).
- Reichl, Johannes and Schmidthaler, Michael and de Bruyn, Kathrin. 2015. Blackoutprävention und –intervention – Endbericht. KIRAS-Sicherheitsforschung. [https://energieinstitut-linz.at/wp-content/uploads/2016/06/BlackO\\_2\\_Endbericht\\_aa0e3.pdf](https://energieinstitut-linz.at/wp-content/uploads/2016/06/BlackO_2_Endbericht_aa0e3.pdf). Consulté le 01.10.2023.
- Renn, Ortwin. 2014. Das Risikoparadox: Warum wir uns vor dem Falschen fürchten. Fischer Verlag (Frankfurt am Main).
- Taleb, Nassim Nicholas. 2012. Der Schwarze Schwan: Konsequenzen aus der Krise. Deutscher Taschenbuch Verlag (München).
- Taleb, Nassim Nicholas. 2013. Antifragilität: Anleitung für eine Welt, die wir nicht verstehen. Albrecht Knaus Verlag (München).
- Taleb, Nassim Nicholas. 2013. Der Schwarze Schwan: Die Macht höchst unwahrscheinlicher Ereignisse. Deutscher Taschenbuch Verlag (München).
- Thurner, Stefan. 2020. Die Zerbrechlichkeit der Welt: Kollaps oder Wende. Wir haben es in der Hand. edition a GmbH (E-Book).
- Vester, Frederic. 2018. Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. Ein Bericht an den Club of Rome. Deutscher Taschenbuch Verlag (München).
- Weick, Karl and Sutcliffe E. and Kathleen M. 2010. Das Unerwartete managen: Wie Unternehmen aus Extremsituationen lernen (Systemisches Management). Schäffer-Poeschel (Stuttgart).

### 3.1 Auteurs

#### **Peter Erhofer**

né en 1955 en Sarre, a commencé une carrière d'officier dans la Bundeswehr après son baccalauréat. Après avoir obtenu son diplôme de pédagogue, il a été affecté à tous les niveaux de direction jusqu'au ministère. Il a été affecté à deux missions en France pendant huit ans. En dernier lieu, il est retourné en Sarre au sein du commandement régional en tant que chef d'état-major, responsable entre autres de la coopération civilo-militaire.

Après sa retraite, il a continué à s'occuper intensivement de la gestion des crises et des catastrophes. Il a ainsi soutenu le service des étrangers de la Sarre lors de la crise des réfugiés de 2015 à 2018.

L'approvisionnement en électricité, les pannes de courant, le blackout et la préparation aux crises sont devenus des thèmes déterminants pour lui. Il a apporté ses connaissances lors de conférences à l'Akademie für Krisenmanagement, Notfallplanung und Zivilschutz (AKNZ) de l'Office fédéral de la protection de la population et de l'aide en cas de catastrophe (BBK). En outre, il soutient depuis 2013 le Saarpfalz-Kreis en tant que conseiller bénévole dans le groupe de travail sur les pannes d'électricité. Il s'est concentré sur le thème » Recommandations d'action et de prévention de la population « , y compris l'information des maires et de la population.

Son livre » Blackbox Blackout « a été publié en 2023.

Contact: [peter.erlhofer@gfkv.org](mailto:peter.erlhofer@gfkv.org)

#### **Herbert Saurugg, MSc**

est un expert international en blackout et en prévention des crises, président de la Gesellschaft für Krisenvorsorge ([www.gfkv.org](http://www.gfkv.org)), auteur de nombreuses publications spécialisées et conférencier invité et interviewé sur le thème des pannes d'électricité, d'infrastructures et d'approvisionnement suprarégionales ('blackout'). Depuis 2011, cet ancien officier de carrière s'intéresse à la vulnérabilité croissante de la société et à la manière dont nous pouvons la réduire. Il tient à ce sujet un blog spécialisé très complet sur [www.saurugg.net](http://www.saurugg.net) et aide les communes, les entreprises et les organisations à se prémunir de manière globale contre le blackout.

Contact : [herbert.saurugg@gfkv.org](mailto:herbert.saurugg@gfkv.org)