

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 12, novembre 2014
Modélisation des Systèmes Complexes

Res-Systemica, volume 12, article 08

Aperçu sur la complexité des systèmes
Cas du réseau de transport de l'énergie

Jacques Printz

article reçu le 04 novembre 2014

exposé du 05 mai 2014



Creative Commons

Témoignage EDF/RTE

Contenu

ASPECTS SYSTEMIQUES DU SYSTEME ELECTRIQUE FRANÇAIS	2
<i>Croissance – La « vie » du système électrique et sa finalité.....</i>	<i>4</i>
<i>Interopérabilité et coopération.....</i>	<i>9</i>
<i>Résilience.....</i>	<i>13</i>
<i>Informatisation et organisation.....</i>	<i>16</i>
<i>Problèmes futurs.....</i>	<i>21</i>

Figures

<i>Figure 1 : La mutation énergétique au début du 20^{ème} siècle</i>	<i>3</i>
<i>Figure 2 : Le système électrique dans les années 20</i>	<i>5</i>
<i>Figure 3 : Publicité pour l'électricité dans les années 20</i>	<i>6</i>
<i>Figure 4 : Interconnexions des systèmes européens</i>	<i>7</i>
<i>Figure 5 : Interopérabilité des moyens de production et de transport.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 6 : Les constantes de temps du réseau de transport.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 7 : Ossatures régionales et périmètres de sûreté</i>	<i>15</i>
<i>Figure 8 : Principes d'informatisation.</i>	<i>18</i>
<i>Figure 9 : Interopérabilité du SI et complexification progressive</i>	<i>20</i>

Remerciements

La rédaction de ce chapitre n'aurait pas été possible sans les contributions de Ms Yves Bamberger, Conseiller du Président d'EDF, membre de l'Académie des technologies, et Pierre Bornard, Vice président du RTE et Président de PowerNext, à l'occasion des manifestations organisées par l'association CESAMES. Nous les remercions tout particulièrement pour le temps qu'ils nous ont consacré et pour les conseils qu'ils ont bien voulu nous donner.

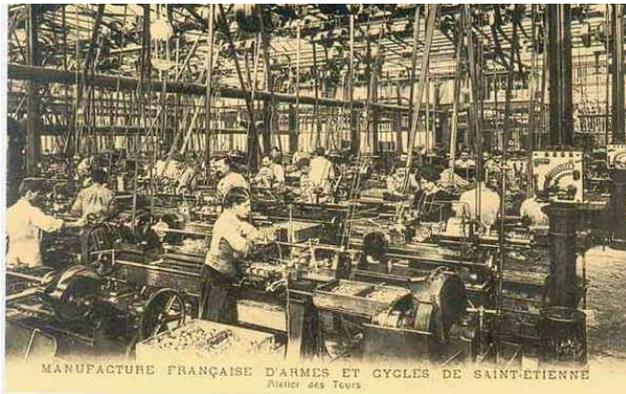
☞ Le contenu de ce chapitre n'engage bien évidemment que ses rédacteurs.

NB : Cette étude de cas est une partie de l'ouvrage en préparation *Introduction à la systémique*, Daniel Krob, Professeur à l'Ecole Polytechnique, Jacques Printz, Professeur Emérite au Cnam. Elle illustre quelques uns des concepts clés de la systémique. Elle fait référence à des chapitres de l'ouvrage en cours de rédaction, sans que cela nuise à sa compréhension. Pour l'avancement de la rédaction voir www.cesames.net

Aspects systémiques du système électrique français

Le système électrique [SE] : production, transport et distribution de l'énergie électrique aux particuliers et aux entreprises, est l'un des objets techniques, au sens de Simondon¹, les plus complexes qu'il nous soit donné d'observer et d'étudier, jusque dans ses moindres détails, car entièrement créé par l'intelligence humaine. Pour Simondon, relayant en cela le message de l'ingénierie système, un objet technique est indissociable de deux communautés humaines : celle qui le conçoit, le fabrique et l'exploite, et celle qui l'utilise. Ingénierie et R&D d'un côté, et usagers de l'autre, soit 30 millions de foyers environ. Chacune des communautés a ses contraintes et ses besoins propres qu'il va falloir harmoniser pour trouver une solution de compromis qui satisfasse les uns et les autres. En particulier la relation entre les concepteurs et les exploitants, car le système doit rester exploitable en toute circonstance. A ce niveau on peut parler de co-évolution.

La disponibilité d'énergie électrique, en abondance et de haute qualité, nous est aujourd'hui tellement familière, que nous avons tendance à oublier les trésors d'intelligence et d'ingénierie qu'il a fallu mobiliser et déployer pour satisfaire un besoin énergétique que nos ancêtres ont mis des siècles à conquérir.



Nous avons tous encore en tête les images des premières manufactures où l'énergie produite par les machines thermiques, au départ ce sont des machines à vapeur, était distribuée sur un axe où d'autres machines venaient prélever ce qui leur était nécessaires avec des courroies de cuir. Les contraintes de la distribution étaient celles de la machine et de sa rigidité mécanique telle que l'opérateur humain n'avait pas d'autre choix que de s'y adapter.

Avec l'électricité, ce dispositif ultra contraignant va radicalement changer, et subir une mutation, une véritable métamorphose, au sens biologique du terme. Ce sera la deuxième vague de la révolution industrielle qui se situe à la charnière des 19^{ème} et 20^{ème} siècles. La figure 1 en donne le schéma de principe.

La mutation vient du fait que l'axe rigide, à quelques engrenages près, qui transmet l'énergie mécanique de la source, au sein de l'usine, est remplacé par un réseau de transport fait de câbles souples, conducteurs de l'électricité, et de convertisseurs/transformateurs. Ce faisant on peut disposer les machines au mieux, d'où une meilleure organisation, plus de confort, moins de bruit, etc. Les premières chaînes de fabrication d'automobiles, chez Ford, sont impensables sans ce type de dispositifs. On peut aussi remplacer les éclairages publics au gaz de ville, très dangereux à cause du gaz qui peut exploser, par des lampadaires comme ceux que nous connaissons aujourd'hui, ou amener l'énergie directement chez les particuliers. Bref, beaucoup d'avantages.

Au moment où l'aventure électrique démarre, la science électrique est déjà bien avancée, grâce à des expérimentateurs de génie, comme Faraday, Edison et beaucoup d'autres, et des savants comme Jean-Marie Ampère ou James Clerk Maxwell qui publiera son fameux traité *Treatise on electricity and magnetism* en 1873. Une grande date de la physique mathématique car pour la première fois la théorie prédit l'existence de phénomènes qui seront découverts plus tard, en l'occurrence les ondes électromagnétiques par Heinrich Rudolf Hertz en 1890.

¹ Cf. sa thèse, *Du mode d'existence des objets techniques*, déjà citée. Voir chapitre *Premières définitions*.

Le schéma de la figure 1 montre également l'élément de base de tout système électrique, élément formé de plusieurs dispositifs : 1) une source d'énergie, 2) un convertisseur de cette énergie en énergie électrique [dynamo, alternateur], 3) un réseau de transport de l'électricité, et 4) divers équipements qui reconvertissent l'énergie électrique selon le besoin : lumière, chaleur, mécanique [moteur électrique], voire chimique comme dans les usines qui fabriquent l'aluminium par électrolyse.

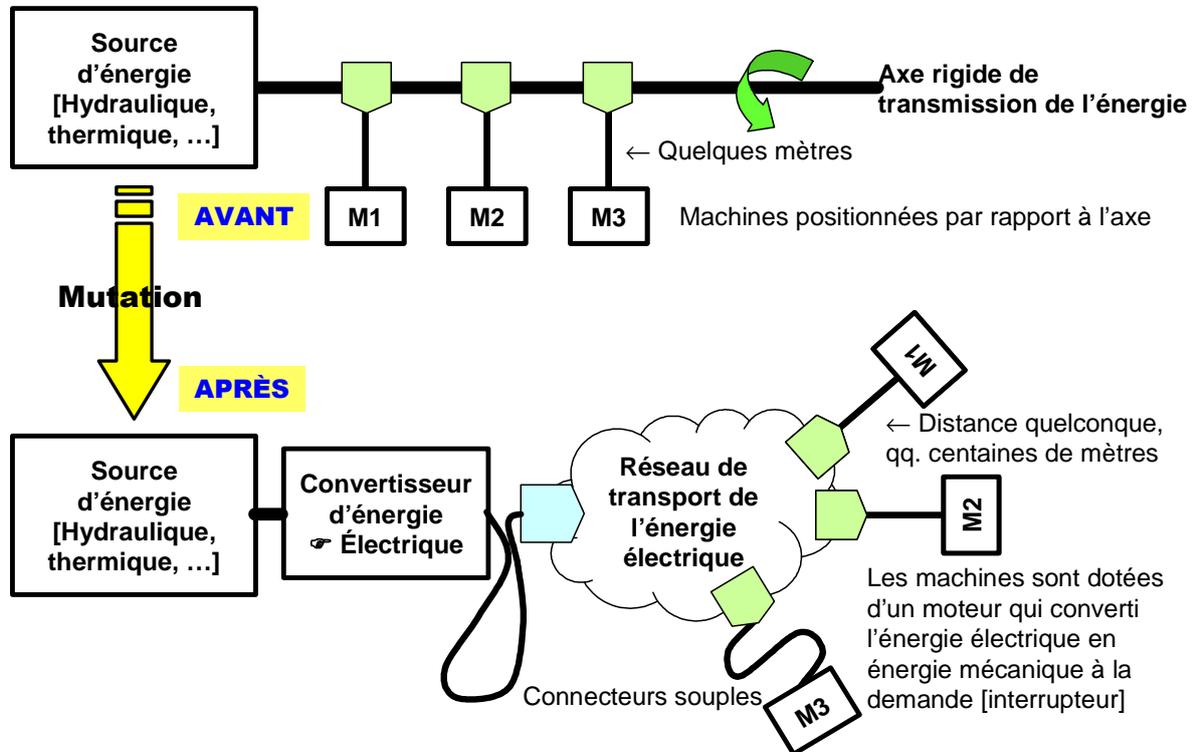


Figure 1 : La mutation énergétique au début du 20^{ème} siècle

Nous avons ici un bel exemple d'unité active [UA]² qui regroupe des moyens techniques et ses deux communautés humaines [usagers + ingénierie au sens large, conception ET opérations].

Cependant :

- Un inconvénient : l'électricité ne se stocke pas, ou très mal [batteries chimiques, piles, etc.]. Il faut consommer immédiatement ce qui est produit, et inversement.
- Deux contraintes : a) l'électricité se transporte facilement, mais au prix d'une dissipation d'énergie [loi d'Ohm], donc il faut optimiser la distance entre les lieux de production et les lieux de consommation, faute de quoi on chauffe l'environnement et le rendement se dégrade. Par ailleurs, b) l'énergie consommée ne doit jamais dépasser l'énergie produite par la machine, à une constante d'inertie près [quelques secondes, voire fractions de seconde], faute de quoi le moteur cale et devient alors une simple résistance qui n'a plus qu'à fondre ! C'est le black-out.

La notion de système, au sens systémique du terme, apparaît véritablement lorsque l'on veut faire coopérer des UA géographiquement voisines. Il peut arriver que UA1 soit excédentaire en énergie, alors que UA2 ne satisfait pas la demande. On a donc $Offre\ UA1 > Demande\ UA1$ et $Demande\ UA2 > Offre\ UA2$. Si on dispose d'un lien $UA1 \leftrightarrow UA2$, alors l'une peut compenser l'autre, de telle sorte que la composition $UA1 \otimes UA2$ satisfasse l'équilibre $Offre \equiv$

² Voir chapitre *Premières définitions*, Paragraphe *Le système et ses invariants*.

Demande indispensable ; faute de quoi le réseau disjoncte [incident majeur qui plonge les usagers « dans le noir »].

Cette notion de compensation est au cœur de la logique du SE car on voit que l'établissement d'un lien d'échange va permettre d'offrir un meilleur contrat de service aux usagers des UA qui coopèrent, pour autant que le lien de régulation fonctionne parfaitement bien. Il y a dans ce mécanisme une symétrie énergétique profonde, liée à l'invariant fondamental offre/demande du système.

Nous n'allons pas présenter le système électrique [SE] en détail, ni ses aspects relevant de la physique, plusieurs ouvrages seraient nécessaires, mais retenir quelques points particulièrement significatifs de l'approche systémique, points que l'on retrouve dans tous les systèmes. Nous retiendrons, entre autres :

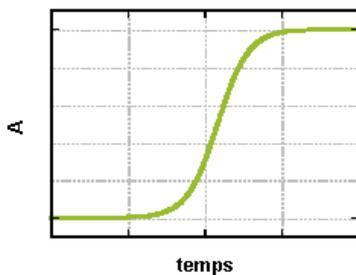
- La croissance du SE dans le temps et dans l'espace.
- La percolation des éléments de bases du SE, et l'interopérabilité de ces éléments entre eux. Comment organiser la coopération des UA « électriques » et réguler les échanges au bénéfice des usagers ?
- La robustesse/résilience du SE soumis à toutes sortes d'aléas, internes et/ou externes, en particulier le traitement des pannes³ et le comportement plus ou moins prévisible des usagers. Comment survivre ?
- L'organisation du SE, en particulier sous l'angle de son informatisation progressive. Comment améliorer l'efficacité [rendement] du système global ?

Bien d'autres points seraient intéressants, mais cela relèverait plus d'un ouvrage complet sur la systémique de ce type de systèmes particulièrement intéressants, où la France est un leader mondial.

Croissance – La « vie » du système électrique et sa finalité

Tout système qui satisfait le besoin de ses usagers va/peut croître de deux façons : 1) augmenter le nombre de ses usagers, et 2) augmenter le nombre de services offerts, et ce pour atteindre une position d'équilibre jusqu'à ce que la population « cliente » soit globalement et durablement satisfaite. Cette croissance du nombre d'utilisateurs doit se faire sans dégradation du contrat de service, et si possible en l'améliorant.

La dynamique de ce type de phénomène est bien modélisée par des systèmes d'équations



comme celles de Lotka-Volterra que l'on rencontre dans de nombreux phénomènes analogues en biologie et/ou en cinétique chimique, en management de projet, etc. Une de ces équations les plus fréquemment utilisées est celle de la courbe logistique, plus connue sous le nom de courbe en S, à cause de sa forme caractéristique : en géométrie, il s'agit de la sigmoïde dont la forme différentielle est $dA = k \times A(\varepsilon - A)dt$, A désignant un paramètre croissance dépendant du paramètre d'évolution t

[c'est un temps « abstrait »], k et ε étant deux constantes ; le terme $(\varepsilon - A)$ signifiant que la croissance est linéairement ralentie au fur et à mesure du développement du système.

NB : Si la croissance est constante, sans ralentissement, on retrouve la fonction exponentielle classique. La dérivée de la courbe est une parabole dont le sommet correspond au point d'inflexion de la courbe. Une variante discrète de cette courbe est la suite logistique, également très utilisée.

D'où une première loi/observation de la systémique :

³ Voir le *Mémento de la sûreté du système électrique* que l'on peut télécharger sans difficulté sur le site du RTE.

☞ Pour satisfaire le besoin de croissance, la communauté en charge de l'ingénierie a deux solutions à sa disposition : 1) **dupliquer/reproduire** le système à l'identique, nonobstant quelques adaptations mineures ou 2) **augmenter** les capacités/services des éléments constitutifs du système actuel, en sachant qu'au delà d'une certaine taille l'élément devient ingérable, et dans ce cas dupliquer.

Pour cela, elle doit disposer du descriptif du système [un modèle statique], et en gérer les évolutions dans le temps [un modèle dynamique], ce qui nécessite d'en connaître la « grammaire » des règles qui le constitue en tant que système. Dans le cas 1, l'**extension** du système est **spatiale**, là où sont les communautés d'utilisateurs nouveaux [voir la figure 2] ; dans le cas 2, l'extension est **temporelle**, le système demeurant localement stable tout en adaptant ses capacités à la demande.

Le système électrique nous offre un magnifique exemple de cette évolution spatio-temporelle. La figure 2 représente l'état de l'électrification dans les années 20. Il y a plusieurs sociétés de production d'électricité ; les réseaux de transports sont partiels et ne sont pas connectés entre eux ; les normes sont quasi inexistantes. On notera que toute la région Nord et Est, ainsi que les vallées alpines sont déjà bien équipées, car c'est là que se concentrent les activités industrielles, en particulier la sidérurgie, les mines et les filatures ; l'aluminium et l'électrochimie dans les vallées alpines. EDF sous sa forme moderne sera créée en 1945, après la Libération, par la fusion d'environ 1450 entreprises.



Figure 1 ■ Cartes des réseaux de transport d'énergie en 1923.

Figure 2 : Le système électrique dans les années 20

La figure 3 nous montre comment nos [arrières] grands parents étaient incités à consommer ce qui n'était pas encore tout à fait la « fée électrique ».

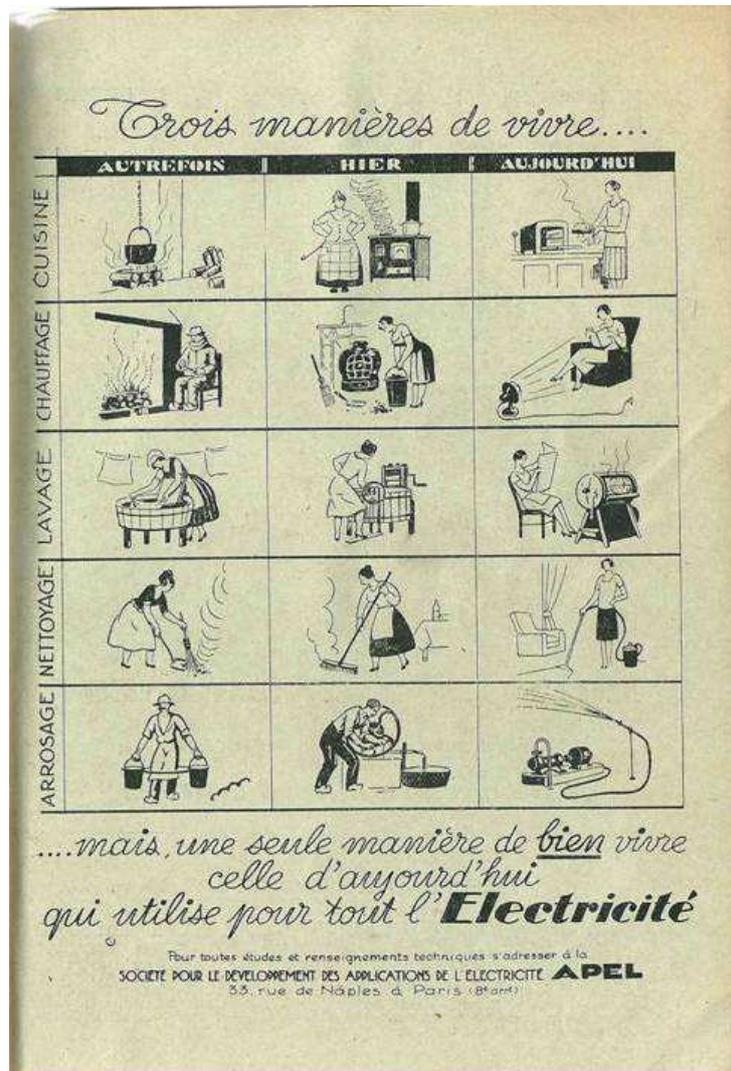


Figure 3 : Publicité pour l'électricité dans les années 20

La figure 4 nous montre l'état actuel des réseaux européens⁴ [juste la partie Nord-Est avec les liaisons Allemagne, Angleterre et Benelux, pour la lisibilité], aujourd'hui massivement interconnectés. En un peu moins d'une centaine d'années, grâce aux efforts de 3-4 générations d'ingénieurs, on est passé d'un état où n'existe que des embryons de systèmes, hétérogènes et indépendants les uns des autres, à un système complètement unifié et synchronisé, alimentant en énergie le moindre recoin du pays, et capable d'échanges avec les systèmes des pays voisins.

Dans l'intervalle, le système électrique est devenue une nécessité vitale de l'économie du pays, sans retour arrière possible, sauf cataclysme qui signerait la fin du bien être social et de la société telle que nous la connaissons.

La question sous-jacente à une telle évolution, somme toute très rapide compte tenu de la complexité intrinsèque des équipements élémentaires, est celle de l'organisation de ces milliers équipements en un tout cohérent, capable de survivre à des aléas violents comme la

⁴ Pour plus de détail, voir le site de l'ENTSO-E : <https://www.entsoe.eu/> ; carte détaillée téléchargeable.

tempête de l'an 2000 où un grand nombre d'équipements ont été détériorés, où de nombreux foyers ont été mis dans « le noir », mais sans coupure générale du réseau, équivalent à toute la France « dans le noir ».

NB : à l'échelle du réseau, une centrale nucléaire est un équipement élémentaire. Mais pris comme tel, c'est aussi un système qui s'adapte aux demandes du réseau. Cela illustre le fait que la notion de système est une notion relative qui dépend du niveau d'abstraction où on se place. Pour le gestionnaire de réseau, une centrale produit ou ne produit pas d'énergie selon une loi de production connue et prévisible.



Figure 4 : Interconnexions des systèmes européens

Pour que cela soit possible, il ne faut pas que l'ajout d'un équipement dans le processus de croissance s'accompagne d'une baisse de la fiabilité générale [FG]. Faute de quoi, en vertu d'une loi de fiabilité bien connue :

$$FG = FEq_1 \times FEq_2 \times \dots \times FEq_N \xrightarrow{N \text{ grand}} 0 \text{ car chaque } FEq \text{ est strictement } < 1.$$

Au contraire, il faut que l'ajout d'un équipement augmente la résilience de l'ensemble. En utilisant une notation de type « point fixe » on doit pouvoir écrire : $FG(SE \otimes Eq) \geq FG(SE)$ dans laquelle SE désigne le système électrique global, et Eq l'équipement que l'on vient d'intégrer. On peut concevoir que cette propriété n'est pas évidente à valider au niveau du réseau européen. La logique de composition du système à partir de ses équipements élémentaires, avec contrôle de la fiabilité, fait partie du modèle global abstrait que nous avons appelé « grammaire » dont on voit une nouvelle fois le rôle central⁵.

Nous pouvons formuler une autre loi/observation de la systémique :

⁵ Cf. chapitre *Premières définitions*.

☞ Pour survivre et se développer, garantir son contrat de service, tout système doit disposer de modèles : a) de son organisation interne, b) de ses éléments constitutifs et c) des relations entre ses éléments, afin que toute action entreprise pour assurer la pérennité de son contrat de service tout au long de son cycle de vie, respecte les invariants qui assurent sa cohérence.

Dans un système de cette taille, il faut organiser les éléments, et donc les modèles, de façon à contrôler les interactions. Si « tout le monde cause avec tout le monde » l'ingénierie devra gérer une complexité qui croît comme le carré du nombre d'éléments, ou plus exactement, leur graphe complet, soit $\frac{N(N-1)}{2}$ liens qui fonctionnent dans les deux sens, soit $N(N-1)$

liens monodirectionnels. La solution est bien connue de toutes les organisations et systèmes complexes⁶ : s'organiser hiérarchiquement, en fonction des constantes de temps et des délais de réactions. Dans ce cas, la complexité croît comme la profondeur de la hiérarchie, c'est à dire en $O(\log_{Base}(N))$. Dans le cas du réseau européen, figure 4, il faut distinguer les réseaux nationaux et/ou relevant de différentes instances de régulation, un seul régulateur en France : RTE, mais plusieurs en Allemagne.

Dans le cas du SE français, on a une hiérarchie à 3 niveaux [voir figure 7] :

1. Le poste d'exploitation, idéalement entièrement automatique, pour la distribution [mais il en reste encore quelques uns manuels],
2. Les systèmes régionaux [SRC], au nombre de sept [les URSE, *Unités Régionales du Système Electrique*], qui assurent un premier niveau de compensation au sein de la région gérée,
3. Le système national [SNC], unique, qui compense les régions entre elles et assure les échanges avec les autres pays, via le CNES, Centre National d'Exploitation du Système Electrique.

Tous ces systèmes fonctionnent 24h/24, 7j/7, avec des systèmes de secours en cas de panne pour assurer la continuité du service, nonobstant le coût des pannes, car il faut de toute façon accepter un certain risque. Les SRC et SNC sont des systèmes semi-automatiques où l'opérateur humain peut prendre la main en cas d'arbitrages conflictuels et/ou de situations imprévues.

Avec le SE on retrouve une des propriétés fondamentales des systèmes tel que Norbert Wiener les avait envisagés : la double trajectographie/dynamique [voir la figure 8]. D'un côté nous avons la demande des usagers qui ne dépend que de leurs besoins à l'instant t ; ce besoin est éminemment variable, en quantité et/ou en qualité, d'un instant à l'autre, ou d'un jour à l'autre, mais il peut être observé et mesuré par des dispositifs de comptage ad hoc [rôle dévolu aux radars dans les systèmes de tir]. De l'autre nous avons une fonction d'offre qui elle ne dépend que de l'état du SE et de ses infrastructures techniques à l'instant t . Cet état est parfaitement connu mais sujet à des aléas imprévisibles que l'on peut également observer et mesurer. Notons qu'un système composé de N équipements interconnectés ayant chacun k états possibles [marche, arrêt, veille, panne, ...] a lui-même un nombre d'états qui croît de façon exponentielle en k^N , donc longs à calculer et difficiles à valider.

NB : Au niveau européen, l'analyse de la complexité du réseau fait que pour calculer les conséquences de la rupture d'une ligne [il y en a environ 15.000], il faudrait analyser et calculer de l'ordre de 300 millions de variables ! L'échelle est en soi un problème fondamental.

Dans les deux cas on peut faire des prévisions de façon à anticiper les évolutions probables de ces deux fonctions et agir de façon à ce qu'elles soient alignées le mieux possible : c'est la

⁶ Cf. Le chapitre 8, *Architecture of complexity*, du livre de H.Simon, *Sciences of the artificial*. Il utilise la métaphore de l'horloge, bien plus simple que le réseau de transport ! Mais moins convaincante.

finalité du SE. En régime nominal [stationnaire], cet alignement est parfait, car soumis aux lois de la physique.

La différence avec les avions du système de tir de N.Wiener au MIT est que, dans le cas du SE, ces deux fonctions sont beaucoup plus complexes. Les espaces où elles se déploient sont des espaces abstraits à un grand nombre de dimensions mais grâce aux outils mathématiques disponibles nous savons les modéliser. La fonction de transfert nécessite une description de grande taille [cf. la notion d'information algorithmique dans les théories de la complexité, chapitre *Complexité et stabilité des systèmes*] mais nous pouvons en avoir une représentation informatique plus ou moins complète grâce à notre connaissance des lois de l'électromagnétisme, et grâce aux données collectées qui permettent de faire des statistiques pertinentes sur les comportements des usagers, comme sur les aléas climatiques, les pannes, etc. L'état global est calculé toutes les ½ heures dans le meilleurs cas. Comme dans le système de tir, la part humaine reste indispensable à la régulation fine, mais somme toute cela fait très peu de personnes aux manettes pour un système de très grande taille, gérant une énergie colossale [100-110 gigawatts en pointe], ce qui montre que quand on a les connaissances, si on le veut, on peut ! Sans les connaissances, on ne peut rien faire, mais cela, pour des ingénieurs et des scientifiques, ce n'est pas un scoop.

Derrière cette problématique d'ingénieur se cache un problème mathématique parmi les plus difficiles que le SE permet de toucher du doigt. Il s'agit de faire coïncider, au sens topologique du terme, deux faisceaux de trajectoires, celles de l'offre [les 75 réacteurs nucléaires, les centrales thermiques, et l'hydraulique] et celles de la demande des 30 millions de clients [particuliers, entreprises et professionnels], qui répondent comme on l'a vu à des logiques différentes. L' ϵ du voisinage est défini par la tolérance admise de l'équilibre Offre/Demande. Si l'on raisonnait dans un espace spatio-temporel 3-D, il faudrait non seulement rapprocher les points des deux faisceaux de courbes à l'instant t , mais aussi les tangentes et les accélérations, ce qui dans un espace 3-D nécessite de s'intéresser à la courbure et à la torsion des trajectoires, soit trois vecteurs et neuf coordonnées, attachés à chaque point. Comme chaque élément du système a sa vie propre, on comprend que l'équilibre général, où l'un compense l'autre, avec des pas de temps inférieurs à la seconde (Cf. la figure 6), n'est pas une grandeur simple à réguler. On comprend aussi pourquoi des sociétés comme EDF et RTE doivent entretenir et développer des compétences en modélisation et en simulation au meilleur niveau mathématique possible, compétences appuyées sur des outils de simulation qui doivent être maîtrisés et parfaitement compris pour ne pas se faire leurrer par les modèles ; on y reviendra en conclusion, à propos des problèmes futurs. Les modèles informatiques qui en résultent, dûment validés par rapport à la réalité physique, permettent de garantir le bon fonctionnement et la stabilité du système [c'est un équilibre dynamique] ; ils sont utilisés quotidiennement par les exploitants des systèmes SNC et SRC.

Interopérabilité et coopération

Pour croître et se développer dans le monde vivant, la coopération entre les organismes semble être la règle. Pour exploiter les ressources énergétiques d'un écosystème la nature a imaginé deux familles de solutions : soit beaucoup de petits organismes partout sur le territoire, soit de très grands organismes comme les éléphants ou les baleines, ou dans le passé les reptiles géants du « parc jurassique », sur de vastes territoires à moitié vides. Mais il semble que la solution privilégiée par l'évolution, à la fois la plus stable et la plus durable, soit la coopération de petits/moyens organismes pour former des super organismes comme ce qui constitue une espèce, ou des collectivités organisées comme les insectes sociaux. L'espèce

perdre bien au-delà de la vie de ses éléments individuels⁷, et dans ce domaine, il semble que ce soit les insectes qui tiennent la corde en termes de longévité. Beaucoup de petits organismes coopérants sont de toute évidence une meilleure garantie de survie. La très grande taille semble être un obstacle que l'évolution a éliminé. La biomécanique et la bioénergétique ont leurs lois qui, associées à un excès de spécialisation, rendent l'adaptation des grands organismes problématiques en cas d'aléas de grande envergure.

On a, toute chose égale par ailleurs, des phénomènes analogues avec les grandes machines que nous sommes capables de construire, du moins en théorie. « Grande » machine signifie grande quantité d'énergie produite/consommée qu'il faut savoir réguler. On sait, quasiment depuis l'époque de Carnot/Clausius que les machines thermiques ont un rendement qui s'améliore avec la quantité d'énergie produite et la taille de la machine [en l'occurrence la production de vapeur à haute température/pression], d'où les dimensions impressionnantes des groupes turbines/alternateurs dans une centrale nucléaire ; dans ce cas bien précis : “*small is NOT beautiful*”. Mais une grosse machine mal équilibrée [un problème d'ingénierie redoutable] va produire des vibrations [une façon comme une autre de dissiper l'énergie perdue] qui peuvent s'amplifier par des phénomènes de résonances, et se concentrer pour finalement détruire tel ou tel élément de la machine, ce qui dans le cas d'un groupe turboalternateur de dernière génération à 1,3 gigawatts se termine par des ruptures de pièces mécaniques qui peuvent détruire la machine ! En production, il y a donc une taille maximum limite à ne pas dépasser qui dépend des technologies disponibles, de la qualité des matériaux et de l'état de l'art des savoir-faire en ingénierie.

NB : Avec les centrales à gaz de dernière génération, c'est moins vrai, car on peut moduler la puissance sur une plage assez large sans altérer le prix du KWh.

L'un des immenses avantages de l'énergie électrique pour les usagers est que l'on peut construire toute une gamme de machines, depuis le très petit jusqu'au très grand, et donc de doser la quantité d'énergie à consommer en fonction du besoin énergétique des particuliers avec des rendements excellents. Il y a donc une dissymétrie structurelle entre la production et la consommation, compte tenu des lois de la physique et des comportements.

Dans le monde vivant, les stratégies de coopération les plus communes sont fondées a) soit sur le partage d'un même génome, au sein d'une espèce, ou b) soit sur le développement de relations symbiotiques, mutuellement bénéfiques, entre espèces différentes. Du côté des sociétés humaines, il semble que l'élément culturel joue un très grand rôle, comme cela a été mis en évidence par certains sociologues et philosophes. Comme disait un humoriste, « la culture est ce qui reste quand on a tout oublié », mais la phrase est plus profonde qu'il n'y paraît. La culture à la même fonction qu'un modèle de comportement. C'est la « langue » du bien commun culturel qui s'acquiert tout au long du processus d'éducation, avant de pouvoir agir efficacement de façon collective. En ce sens il est un élément d'une « grammaire sociale » qui organise la société⁸. Une langue mal assimilée est un risque collectif que fait courir un individu mal formé et/ou violant délibérément les règles. Le terme « culture d'entreprise » fait partie du vocabulaire de la bonne gouvernance, et dans le cas d'entreprises en charge de biens collectifs comme l'énergie, les chemins de fer, les communications, ... le terme n'est pas un vain mot.

Du côté des usagers, on est plutôt dans une relation de type symbiotique, une co-évolution, qui se traduit par l'achat d'un service, en contrepartie d'une fourniture d'énergie respectant un contrat de service négocié entre le consommateur et le fournisseur. On ne peut évidemment

⁷ Pour une analyse approfondie, voir le testament de S.J.Gould *La structure de la théorie de l'évolution*, 2002, Gallimard, 2006 en français, en particulier le chapitre 8, *Les espèces en tant qu'individus dans la théorie hiérarchique de la sélection*.

⁸ Voir, par exemple, Christina Bicchieri, *The grammar of society – The nature and dynamics of social norms*, Cambridge UP, 2006.

pas demander à l'utilisateur de connaître le modèle du système qu'il utilise, mais il doit cependant respecter certaines règles stipulées dans le contrat de service. De même, on ne demande pas à l'automobiliste de connaître la mécanique et l'informatique embarquée pour utiliser son véhicule, mais là aussi, il doit respecter des règles comme le code de la route et entretenir son véhicule.

Toutes ces considérations vont se retrouver dans les systèmes artificiels, en particulier dans le système électrique. En effet, pour desservir le maximum d'utilisateurs de façon équitable, en prenant en compte les problèmes de taille des machines et des organisations, la solution la plus naturelle est de mutualiser la partie technique du SE et les équipes d'ingénierie. Autrement dit, il faut rendre les UA électriques dont on a parlé précédemment, interopérables. On aboutit ainsi à une situation où il n'y a plus qu'une unique communauté d'utilisateurs mais aux besoins divers et un réseau de transport qui achemine à la demande l'offre de tous les moyens de production mutualisés. La transformation effectuée est résumée par la figure 5.

Dans cette approche, un utilisateur ne sait pas d'où provient son énergie. Le réseau de transport assure un service global aux utilisateurs en optimisant au mieux les mécanismes de compensation dont nous avons parlé plus haut, entre les moyens de production disponibles. Il fonctionne conformément aux lois de Kirchhoff. Le maillage du réseau permet de définir plusieurs chemins de transport, depuis la production, en général, vers les utilisateurs, donc permet d'améliorer le contrat de service ; et ceci, désormais, également au niveau européen. Les utilisateurs étant connectés au réseau de transport, via le réseau de distribution initialement géré par EDF mais aujourd'hui il y a environ 155 opérateurs dont les principaux sont ERDF, GDF-Suez, etc. Si l'on raisonne en termes de modèles on voit que l'un des problèmes majeurs de la transformation va être la mise en cohérence des modèles de chacune des UA électriques initialement indépendantes, et de leurs interactions. L'organisation du SE va passer d'une architecture « en silos » à une architecture hiérarchique « en couches ».

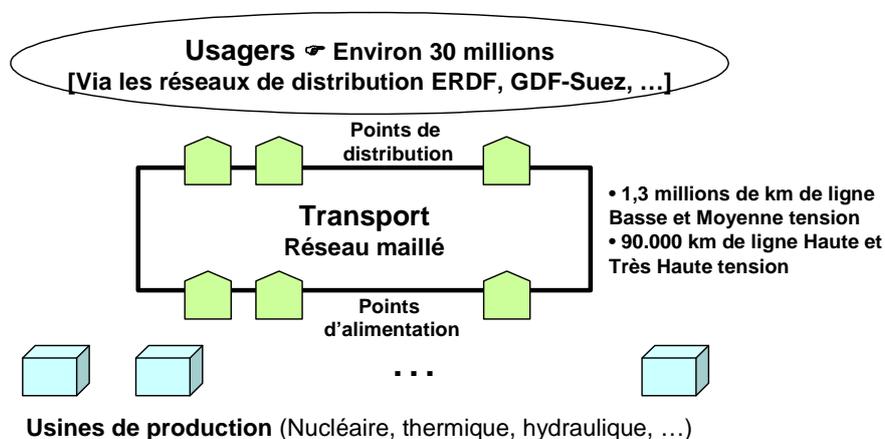


Figure 5 : Interopérabilité des moyens de production et de transport.

Pour la mise en œuvre de ce type de solution, l'interopérabilité va se traduire par la prise en compte cohérente de familles de contraintes spécifiques aux différents éléments du système technique, matérialisées dans les différents modèles :

- Contraintes organiques liées à la nature et à la physique des équipements constitutifs du SE, par exemple une ligne HT ne peut pas acheminer plus de x KW, sinon elle fond !
- Contraintes d'ingénierie de projet, car ce qui était un [relativement] « petit » projet dans le cas de l'architecture silo va devenir un « grand » projet complexe dans une architecture en couche, avec cette fois la prise en compte de limites liées à la taille des

projets que l'on est capable de mener à bien ; 10 projets indépendants de 100 personnes, c'est bien autre chose qu'un projet unique de 1.000 personnes. Il faut alors démontrer son « agilité » qui est le prix à payer du changement d'architecture.

- Contraintes d'usages qui font que les usagers sont tenus de respecter des règles dont ils n'avaient pas à se soucier quand les UA électriques étaient indépendantes. Le système peut se protéger des malveillances, mais seulement jusqu'à un certain stade.

Pour ne citer qu'un seul exemple, on peut mentionner, coté système physique, la mise en place de standards concernant le voltage et la fréquence du courant pour les usagers, soit 380/240 volts triphasé en 50 Hz, avec un accord interprofessionnel qui concerne l'ensemble des acteurs de la filière électrique.

NB : Pour l'anecdote, le laboratoire d'électrotechnique de l'Ecole Centrale était encore alimenté en courant diphasé dans les années 60, dans Paris.

Les règles communes à ces nouvelles communautés vont toucher beaucoup plus de monde, elles seront nécessairement un peu plus nombreuses et il faudra veiller à ce qu'elles ne deviennent pas contradictoires, ce qui est un problème logique difficile quand elles sont nombreuses. Le principe de sobriété, le célèbre « rasoir d'Ockham » devra être respecté à la lettre sous peine de « perdre les pédales » afin que le SE et ses usagers ne se transforment pas, au final, en une Babel ingérable. Le principe darwinien de survivance du plus apte qui peut fonctionner avec des UA électriques indépendantes, celles qui ne remplissent pas leur contrat de service disparaissent, ne fonctionnent plus au niveau global du SE. Les règles de survie au niveau d'une espèce sont différentes de celles applicables aux membres de l'espèce.

La logique de la coopération est d'une autre nature que celle qui régit le comportement d'un individu isolé. Elle est fondée sur la confiance. On pourrait également citer le théorème de Bellman qui dit que l'optimum global d'un système n'est pas la somme des optimums locaux de chacun de ses éléments. La logique de la coopération requiert des acteurs plus vertueux, que ce soit les usagers ou les équipes d'ingénierie, c'est le prix à payer du confort apporté par la mise en commun des ressources. Dans le cas de l'ingénierie c'est un point de fragilité de l'approche, car l'apprentissage et la montée en maturité, c'est le rôle du système qualité, sont des phénomènes de moyen/long terme qui peuvent être incompatibles avec une logique financière qui privilégie toujours le court terme.

Dans le cas du SE, des équipements comme les réacteurs EPR en cours de construction sont conçus pour des durées de vie aux alentours de 100 ans, ce qui signifie que ceux qui les ont conçus ne seront plus là pour voir leur démantèlement en fin de vie.

En conclusion, on peut voir se profiler une autre loi/observation de l'approche système :

☞ Interopérabilité va concrètement se traduire par modèles partagés, ce qui veut dire que les modèles doivent être explicités en tant que tel, et non implicites dans la tête de quelques acteurs que l'on consulte comme des oracles. Le modèle commun, abstrait, de ces différents modèles [dans le jargon informatique, on dit un « métamodèle »] doit être connu de toutes les parties prenantes, chacune pour ce qui la concerne, afin que tous les acteurs agissent conformément à la logique du modèle qui organise les échanges.

☞ Ce modèle abstrait fonctionne comme une langue parlée par les acteurs du système : il définit la grammaire du système. Il est du devoir des acteurs, en particulier des « grammairiens » en charge de sa définition, de la considérer comme un bien commun qui nécessite toute leur attention car sa cohérence est fondamentale.

Le modèle doit être distingué de la documentation du tout venant, laquelle doit d'ailleurs en respecter les règles.

Résilience

Nous prendrons le mot résilience dans son sens littéral qui est une mesure de la capacité d'une pièce mécanique à résister aux chocs, c'est-à-dire sa capacité à absorber l'énergie d'un choc, en continuant à rendre le service attendu sans se rompre. La transposition du concept dans le monde des systèmes soumis aux aléas de l'environnement est évidente.

Nous venons de voir dans la section précédente tous les avantages liés à la mutualisation et à la mise en commun des ressources pour offrir un meilleur service aux usagers. Mais mutualiser va également signifier mutualiser les aléas. En conséquence ce qui était un incident ou une panne locale, au niveau d'un poste d'exploitation ou une région, risque désormais d'affecter globalement le SE, y compris au niveau européen, compte tenu des interconnexions [voir figures 4 et 7]. C'est ce qu'il faut à tout prix éviter car si ce n'est pas le cas, la mutualisation est un échec.

L'un des très grand succès du SE est que non seulement la mutualisation a été réussie mais que de plus, le contrat de service se trouve amélioré grâce aux mécanismes compensateurs que le réseau maillé va permettre de développer. Si une ressource disparaît pour une raison quelconque, mais que par ailleurs il existe une ressource équivalente présentement disponible, alors la défaillance pourra être compensée. En fait, le réseau global fonctionne, car il a été conçu tel, comme une assurance. On mutualise les risques encourus par les usagers car le réseau, dans sa globalité, ne subit pas les aléas au même instant ; c'est en fait le réseau lui-même qui encaisse le risque et qui le gère.

Le réseau de transport maillé est le siège de phénomènes énergétiques intenses car il achemine potentiellement toute la production disponible, environ 100 Gigawatts, et même un peu plus par grand froid quand il faut s'approvisionner à l'extérieur. Pour donner un élément comparatif, un camion de 35 tonnes à 110 km/h, libère en cas de choc une énergie équivalente à 16 MW, soit 80 camions pour une centrale de dernière génération [1,3 GW], et plus de 6.000 pour toute la production. C'est l'équivalent d'une gigantesque machine qu'il va falloir réguler soigneusement pour maintenir les équilibres fondamentaux comme la relation offre/demande. Par exemple si une artère du réseau ne fonctionne plus, pour une raison quelconque, l'énergie correspondante est quasi instantanément reportée sur d'autres équipements qui doivent alors absorber l'équivalent d'un choc.

La figure 6 donne un aperçu des aléas temporels contre lesquels les gestionnaires du réseau de transport doivent se prémunir. Par exemple un coup de foudre est un phénomène énergétique très rapide, inférieur au millième de seconde, qui peut détruire un équipement qui devient de ce fait instantanément indisponible. Une coupure brutale peut engendrer des surtensions destructrices, et même former des arcs électriques avec les très hautes tensions. Dans les pays nordiques comme le Canada, certaines lignes électriques peuvent être affectées par les orages magnétiques générés par l'activité solaire à cause de la proximité du Pôle Nord.

Ceci étant, certains des phénomènes peuvent être anticipés : un orage ne se déclenche pas par temps clair, il y a toujours des signes avant coureurs, et la météo donne des prévisions et des alertes orages ; idem pour l'activité solaire [Les ondes électromagnétiques mettent environ 15 minutes pour parcourir la distance terre soleil, mais les particules qui perturbent le champ magnétique terrestre sont beaucoup plus lentes]. Le rôle de la prévision va être essentiel pour gérer les aléas, ainsi que les instruments de mesures indispensables pour observer ce qui se passe réellement. Par exemple la température des équipements est une information précieuse, comme le niveau d'eau dans les barrages de retenues, ou encore les prévisions météo pour la température locale, etc. ... etc. La gestion des informations correspondantes et la tenue de statistiques sérieuses vont permettre aux gestionnaires du réseau d'agir en toute connaissance de cause, et de faire des simulations pour comprendre ce qui se passe en temps réel [ce qui

peut nécessiter une grande puissance de calcul], ou ce qui s'est passé grâce à des simulations différées, hors temps réel.

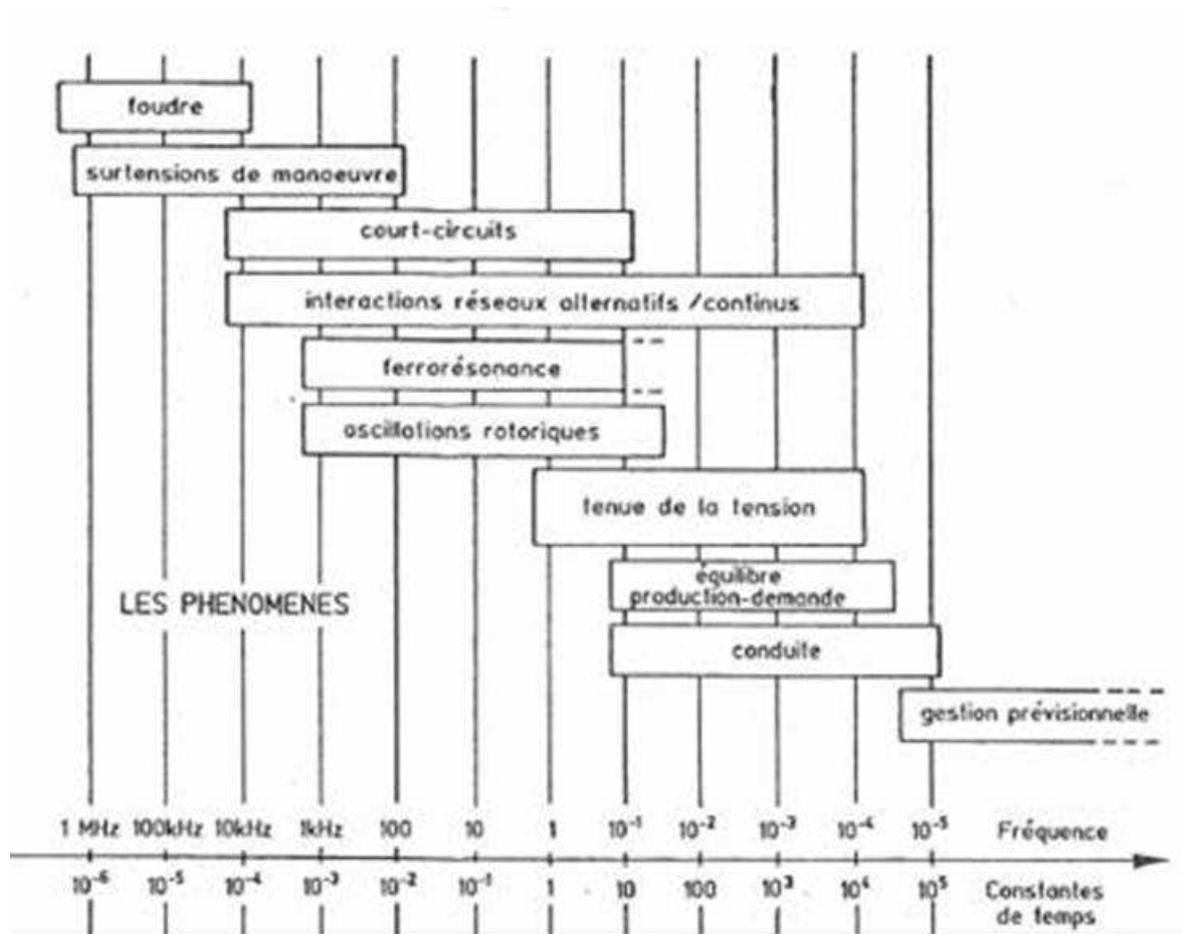
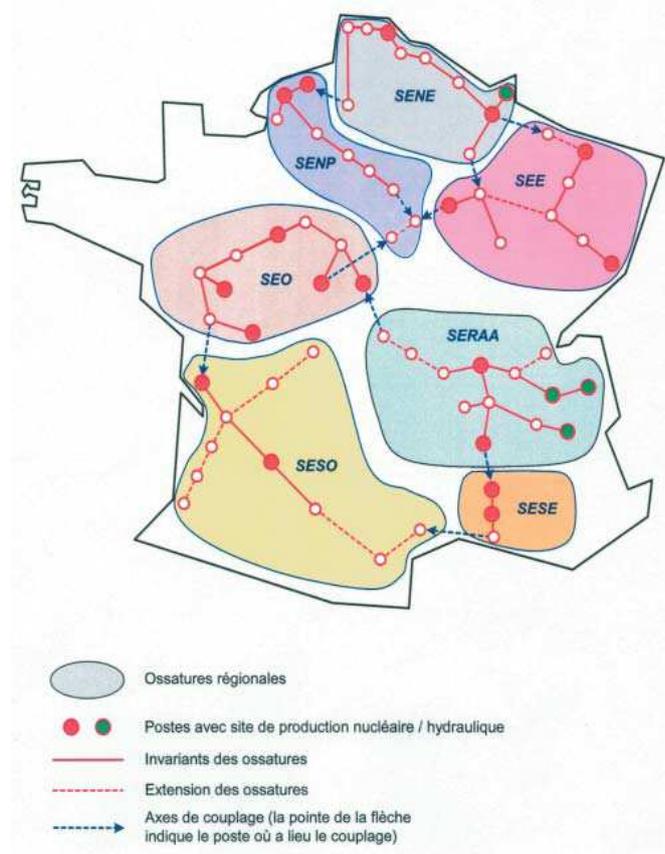


Figure 6 : Les constantes de temps du réseau de transport.

Une fois que la panne a été diagnostiquée il faut établir un périmètre de sécurité afin d'éviter la propagation du choc à l'ensemble du réseau, et transmettre l'information aux gestionnaires du réseau. C'est un mécanisme classique, bien connu, qui cependant peut être difficile à mettre en œuvre compte tenu de la rapidité de certains phénomènes. Il faut alors jouer sur les phénomènes d'inertie propres aux équipements du réseau. Par exemple, une ligne HT qui encaisse une surcharge occasionnée par la rupture d'une autre ligne va commencer par chauffer, le câble va se dilater et se rapprocher du sol jusqu'à déclencher un arc électrique destructeur ou fondre, etc. mais tout cela va prendre un certain temps pendant lequel les gestionnaires vont pouvoir agir et organiser les délestages, compte tenu des contrats de services des uns et/ou des autres. La connaissance précise du comportement des équipements dans des situations limites, hors du fonctionnement nominal, est indispensable à la bonne gestion des rétroactions déclenchées par les gestionnaires du réseau. Cette connaissance sera matérialisée sous la forme d'un ou plusieurs modèles, lesquels constituent un préalable à toute informatisation sérieuse ; ils définissent l'ensemble des actions possibles, c'est-à-dire une « grammaire » du système, au sens linguistique du terme, un aspect structurant développé dans cet ouvrage. C'est un domaine où la simulation peut apporter des informations précieuses sur les décisions à prendre en quelques minutes, en fonction des situations rencontrées.

Ces retours d'expérience sont indispensables à la bonne compréhension des problèmes nouveaux qui affectent régulièrement le réseau dans sa globalité.



La carte de la figure 7 montre l'organisation des ossatures régionales qui délimitent des périmètres de sécurité. En cas de problème, les régions peuvent être séparées les unes des autres. Cette carte illustre les limitations en taille et en capacité de management qui doivent être prise en compte pour que le SE reste globalement gérable et que le maximum de foyers restent alimentés. Cette information est centrale pour comprendre la logique de la modélisation et des modèles associés.

Figure 7 : Ossatures régionales et périmètres de sûreté

Il y a une grande leçon à tirer de ces mécanismes en matière d'organisation des systèmes en général :

☞ Il faut connaître aussi parfaitement que possible la nature des phénomènes auxquels le système est confronté, et prendre en compte les biais cognitifs toujours possibles avec les acteurs humains. La sûreté de fonctionnement du SE a le même rôle qu'un système immunitaire, toutes choses égales par ailleurs : protéger le système contre les aléas de l'environnement et les défaillances internes.

- Cela vaut pour l'environnement extérieur du système, le DEHORS, environnement que l'on peut toujours observer. En cas de manque de connaissance sur cet environnement, c'est un devoir de l'observer, car sans observations, sans mesures réelles, le retour d'expérience sera impossible, ou alors ce sera de la magie. Le comportement des usagers doit pouvoir être analysé. Ils ont des droits mais aussi des devoirs.
- Cela vaut également pour l'intérieur du système, le DEDANS, intérieur qui comprend toujours deux composantes : 1) une composante organique, avec des équipements matériels dont on connaît la physique et le comportement, par définition, mais encore faut-il être capable d'exploiter l'information correspondante, et 2) une composante organisationnelle et humaine qui en assure l'ingénierie, dont on connaît les limites ; le premier devoir du management est de s'assurer que les personnels en charge de cette ingénierie ont les compétences requises, et que l'organisation joue correctement son

rôle, par exemple ne pas cacher les problèmes ; c'est le prix de la confiance des usagers du système.

Une autre leçon est celle de la qualité des informations collectées. Cette qualité est essentielle à la compréhension des phénomènes, quels qu'ils soient, y compris les phénomènes organisationnels et humains comme ceux qui ont lieu lors des retours d'expérience [taux de pannes], ou de l'analyse des comportements des usagers, y compris les actes de malveillances.

☞ Sans information pertinente, ce qui met en jeu toute la chaîne qualité, l'organisation de ce type de système est impossible, d'où le rôle des systèmes d'information dont nous allons parler maintenant.

Informatisation et organisation

Dans un système d'aussi grande taille que le SE, il est indispensable que l'information concernant l'état présent et futur [appelé « gestion prévisionnelle »] du système remonte vers les centres de décisions et les gestionnaires du système [production, transport et distribution]. L'information disponible/accessible aux gestionnaires dépend de la « physique » du système et de sa structure organique, laquelle est optimisée avec comme critère principal la sûreté de fonctionnement et d'une façon générale le contrat de service [C'est la mission du système qualité]. Cette structure est doublée d'une organisation « humaine » qui doit fonctionner comme une « machine » à prendre des décisions [et non à flatter les ego !] qui relève de sa sphère de contrôle/compétence. Il est donc indispensable que ces deux structures soient « alignées » afin qu'elles agissent en symbiose mutuellement bénéfique, faute de quoi les décisions seront inadaptées ce qui dans le cas du SE et des phénomènes énergétiques intenses à gérer serait un risque considérable. Il va sans dire que tous les exploitants doivent être parfaitement formés aux risques et que leurs décisions sont souveraines, sans remise en cause possible. La culture qualité dans ce contexte n'est pas un vain mot.

Comme dans le système de tir qui avait fait l'objet des études initiales de N.Wiener, il faut distinguer les automatismes qui sont hors de portée des capacités humaines, le temps réflexe propre au système, et ceux qui relèvent de décisions humaines, le temps réfléchi ; avec entre les deux, des automatismes intermédiaires qui vont dépendre des performances humaines [Exemples : piloter un avion de combat ou une formule 1 requiert des capacités physiques exceptionnelles ; commander une opération militaire requiert une connaissance aussi précise que possible des capacités des hommes et des matériels, une grande lucidité, une résistance au stress, y compris celui généré par les politiques, et un vrai courage].

Un groupe turbine/alternateur de 1.300 Mégawatts, qui tourne à 3.000 tr/min pour stabiliser la fréquence à 50 Hz requiert des automatismes dont la boucle de rétroaction est de l'ordre de la milliseconde, totalement inaccessible à l'homme. Idem pour un équipement anti-foudre [voir la figure 6]. A l'opposé du spectre temporel, la conduite et la gestion prévisionnelle, requiert le temps réfléchi car il faut évaluer l'impact des décisions en fonction de la situation réelle à l'instant t , car plusieurs choix sont généralement possibles.

Les capacités des TIC ont évidemment joué un grand rôle dans l'évolution du système et de son organisation. Donnons deux exemples :

- La fiabilité des réseaux de données permet de transformer la conduite in situ en télé conduite, ce qui va permettre de mieux gérer un ensemble plus important de ressources jusqu'à une taille optimum intégrant les limites des capacités humaines. Elle permet de dissocier le contrôle proprement dit, des opérations in situ, ce qui améliore la prise de décision.

- Les capacités de traitements des ordinateurs vont permettre a) de faire une gestion prévisionnelle beaucoup plus fine, voire même des simulations temps réel dans certains cas favorables, donc une meilleure gestion des sources d'énergie thermique, fuel et gaz, ou hydraulique, une ressource à économiser car mobilisable en quelques secondes ; et b) de mieux répartir la charge du réseau.

La composante informatique du SE va donc prendre une importance de plus en plus grande, avec en perspective le réseau de transport dit « intelligent », le “ *smart grid* ”, indispensable pour gérer correctement l'intégration des énergies renouvelables, massivement distribuées et aléatoires par nature, dans le fonctionnement du système fondé, rappelons le, sur l'équilibre offre/demande [entre autre], ce que tout le monde peut comprendre. Le principe est donné par le schéma de la figure 8.

La dichotomie DEDANS/DEHORS est matérialisée par les deux courbes *Evolution de la demande* et *Evolution de l'offre*, courbes qui dans l'idéal devraient se juxtaposer parfaitement, bien que les aléas auxquelles elles sont soumises soient très différents ; rappelons, comme on l'a dit précédemment qu'il s'agit de familles de courbes. La fluctuation de la demande devient plus aléatoire : elle dépend des décisions de chacun des 30 millions d'utilisateurs. La fluctuation de l'offre est mieux structurée, en fonction des plans de charges de chaque unité de production [UP] mais soumise aux aléas climatiques nonobstant les modèles de la météo et leurs incertitudes, aux pannes des équipements, et depuis quelques années aux risques terroristes.

La taille du système et le cycle de base de la régulation font que les volumes de données qui circulent sur les artères de communication peuvent être colossaux. Par exemple si on souhaite échantillonner à la minute l'état de la demande des 30 millions d'utilisateurs via des compteurs « intelligents », le SI devra traiter environ 43 milliards de messages/jour !!! Il est donc indispensable de faire des regroupements permettant d'agréger les données d'utilisateurs ayant des profils comparables. Ce faisant le système raisonne alors avec un « consommateur moyen » qui peut ne plus refléter le besoin spécifique des individus.

Du côté des équipements lourds, beaucoup moins nombreux que les utilisateurs, la situation n'est cependant pas meilleure car il faut échantillonner beaucoup plus fin des états bien plus complexes, mais surtout garantir les temps de réponses. Un équipement en surchauffe doit garantir une rétroaction de l'ordre de la minute pour rester nominal, ce qui peut rapidement être incompatible avec les capacités de traitements et/ou les débits de transmissions des données. Certaines décisions de black-out peuvent nécessiter une intervention humaine, au mieux de l'ordre de quelques minutes, dont le système doit tenir compte.

Ce qu'illustre parfaitement le SE est le fait qu'une « intelligence » centralisée ne pourra pas satisfaire le contrat de service. Sa centralisation est en soi un risque, car tout le système dépend du « centre ». Il faut organiser la prise de décision par subsidiarité et « distribuer l'intelligence », mais pas de façon quelconque, surtout pas au hasard, comme l'indique la figure 7. La bonne solution c'est la coopération des processus de régulation, via un échange d'information pour se synchroniser quand c'est nécessaire ; c'est la seule façon de « casser » la combinatoire⁹ et de l'organiser de façon humainement gérable. Le SE montre à lui tout seul l'inanité du postulat du déterminisme absolu formulé par Laplace dans son traité des probabilités : « *Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de ce qui va suivre. Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le*

⁹ Ce sont des « produits » d'automates dont la théorie a été élaborée par A.Arnold et M.Nivat, dans les années 1970.

passé, serait présent à ses yeux ». Et pourtant Laplace était un grand esprit ! Sans le savoir, il fait de la métaphysique¹⁰. Son postulat est simplement faux, ou plus exactement dénué de sens et inapplicable, sauf à supposer que l'information est transmise et traitée avec une vitesse infinie, et ne coûte rien. Donc méfiance, et prudence, quand on est confronté à des problématiques de systèmes complexes réels, qui plus est ouverts sur l'extérieur, où tout a un coût énergétique, y compris l'information nécessaire à la régulation. C'est le paradoxe du « Démon de Maxwell », inconnu à l'époque de Laplace, qui joue un rôle important en matière d'information [Voir le Chapitre *Premières Définitions*].

Ramené à l'échelle énergétique de l'univers et des phénomènes astronomiques, le SE est un petit objet !

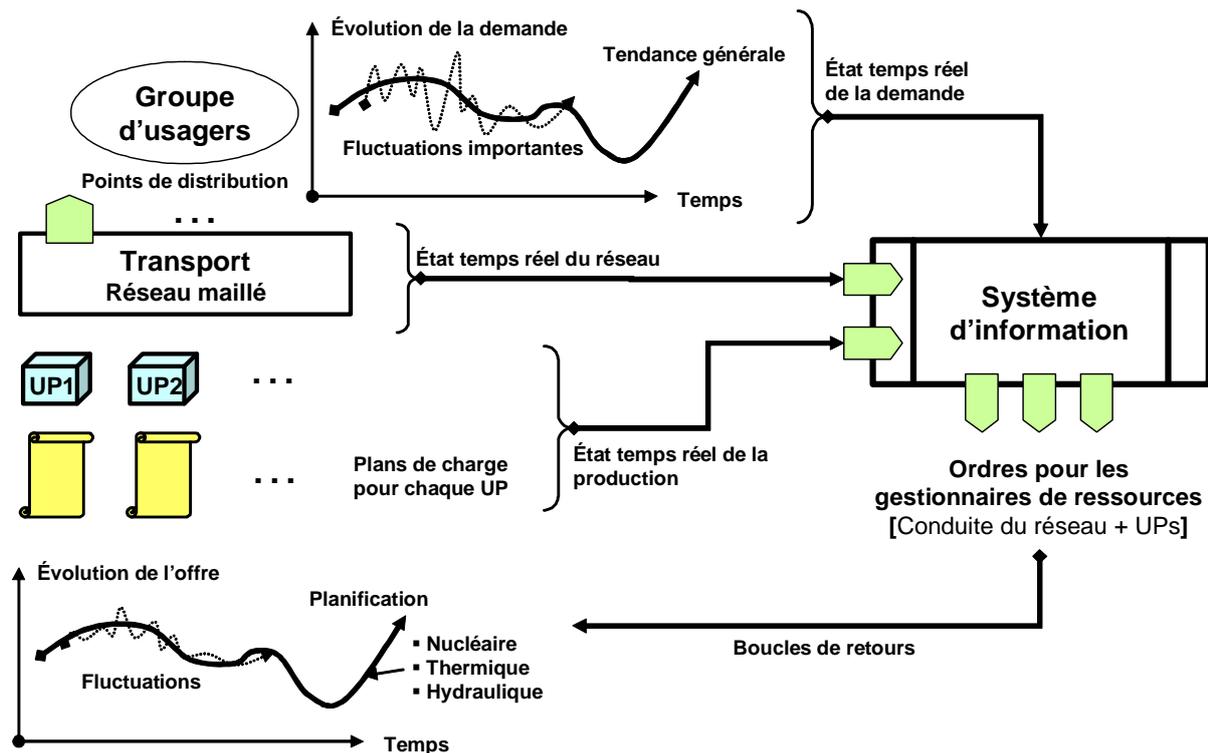


Figure 8 : Principes d'informatisation.

Une autre leçon du SE est que pour assurer le contrat de service, il faut distribuer l'intelligence au plus près du lieu de la décision, de façon à ce que la boucle de rétroaction soit compatible d'une part avec les contraintes locales, et d'autre part avec les contraintes globales du SE. Une décision qui sauvegarderait localement le service en mettant le reste du système « dans le noir » serait à coup sûr une mauvaise décision. Mais alors, comment distribuer l'intelligence de façon cohérente ? Où mettre le curseur ?

D'abord en hiérarchisant, comme on l'a vu dans la première section de ce chapitre (niveau national, niveau régional et postes d'exploitation), mais surtout en distribuant à bon escient les règles globales à respecter impérativement dans tous les éléments de la hiérarchie, nécessairement hétérogènes. C'est une nouvelle illustration de la prégnance des modèles qui reflètent la logique globale que toutes les UA du SE doivent respecter. Idéalement, tout nœud doit pouvoir jouer le rôle de centre, ils doivent donc tous disposer du modèle global abstrait, même si localement il n'en utilise qu'une partie.

¹⁰ Bien évidemment, on ne peut pas lui reprocher d'ignorer ce qui sera découvert, un siècle plus tard par Einstein !

Si l'on a bien compris le message de Von Neumann rappelé dans les chapitres d'introduction [*L'héritage de N. Wiener et Premières définitions*], « Qui garde les gardiens ? », il faut s'assurer que les modèles sont correctement utilisés là où ils doivent l'être et mettre en place le système de contrôle qui s'en assure, lequel pour échapper au paradoxe du démon centralisateur de Laplace doit être nécessairement distribuée, en quelque sorte un démon, intégré à chaque noeud du système, dont la seule mission est de se poser en permanence la question : « Est-ce que je fais correctement ce qu'il m'a été prescrit de faire », éventuellement en allant voir ce que fait le nœud voisin ! Si une règle est violée, quelle qu'en soit la raison, il convient de faire monter les alertes vers qui de droit ... et de prendre des mesures drastiques d'isolation et de reconfiguration. On est alors très proche des phénomènes biologiques d'apoptose chers à Jean-Claude Ameisen¹¹. Cette UA qui viole les règles communes ne fait pas, ou ne fait plus, partie du système ; sa défaillance probable la condamne, elle doit être isolée, confinée puis retranchée du système car la survie de l'ensemble est désormais enjeu.

Le plus surprenant avec l'informatisation du système est que progressivement, cette partie informatisée du système va représenter une espèce d'image virtuelle duale « informationnelle » de ce système, image dont une partie est précisément une instance du modèle des équipements gérés et des échanges énergétiques. Cette abstraction nouvelle, pas évidente à détecter à première vue car c'est une « forme » logique immatérielle, un ensemble de relations, émerge progressivement de sa gangue matérielle, en particulier grâce aux contraintes d'interopérabilité spécifiques au SI.

Nous donnons, figure 9, une image réelle [élaborée début des années 2000¹²] de cette évolution fondamentale [c'est une bifurcation, un point de non retour], au moment de la prise de conscience de la nécessité de revoir l'évolution du dispositif où les besoins d'échanges d'information se sont traduits par des liens informatiques entre les éléments concernés. Cette cartographie représente un volume de code aux alentours de 20 millions de lignes source, soit environ 5.000 hommes×ans de développement [hors maintenance], en unités d'oeuvres « brutes », mais trois ou quatre fois plus en unités « nettes », compte tenu des aléas et du taux de succès des projets, selon les statistiques du Standish Group¹³. Très vite la prolifération du nombre de liens qui ne font que traduire le besoin d'échanges, est devenu un frein à l'évolution du système, car c'est une combinatoire en N^2 , ... et il a fallu réfléchir ...

Le réseau de transport physique se double d'un réseau de transport d'informations, sous forme de messages généralement asynchrones devant respecter des échéances temporelles, ce qui dans le jargon informatique s'appelle un bus d'échanges par lequel vont transiter, en théorie, tous les échanges d'information entre les équipements. L'architecture de ce bus est l'image exacte des échanges antérieurement physiques entre les éléments du système, conformément à leur organisation.

A ce titre, l'organisation de ce bus est un élément fondamental du modèle de compréhension/action global du système, ce qui corrobore l'idée que le langage informatique est effectivement le langage de spécification des modèles, un langage que l'on va pouvoir « travailler » comme tel grâce aux technologies informatiques [théorie des langages, machines abstraites, etc.], mais sans jamais perdre de vue la finalité de ce vaste ensemble. Pour cela, il faut définir la sémantique des actions à effectuer à l'aide d'une machine abstraite réalisable sur n'importe quel ordinateur du commerce [sémantique opérationnelle]. Le bus logiciel joue un rôle de médiateur en cassant la complexité que les couplages points à points [d'un point de vue électrique, ce sont des courts circuits] avaient créée au fil des adaptations successives.

¹¹ Cf. son livre *La sculpture du vivant*, au Seuil.

¹² Par une équipe du RTE, en relation avec les équipes de la DER à Clamart, avec laquelle j'ai eu la chance de travailler comme conseiller.

¹³ Cf. le site <http://versionone.com/assets/img/files/ChaosManifesto2013.pdf>

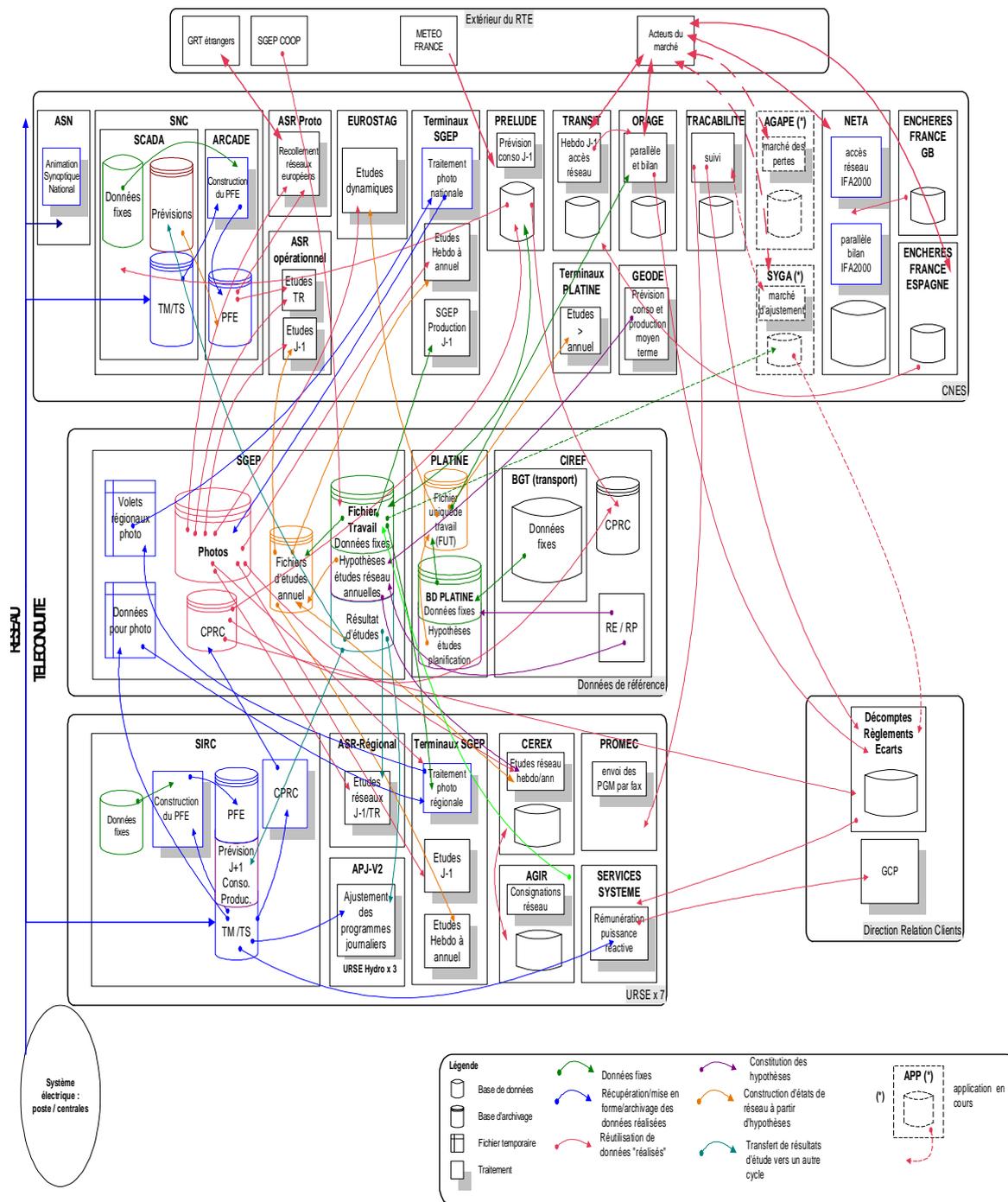


Figure 9 : Interopérabilité du SI et complexification progressive

Le point le plus remarquable est que l'« image logique » ainsi obtenue est l'exact reflet de ce qu'il est indispensable de connaître [à la fois nécessaire et suffisant] pour interagir correctement avec le système. C'est une grammaire qui permet de « parler » la langue du système qui respecte la contrainte dedans/dehors, une vieille idée des logiciens du Cercle de Vienne¹⁴ que Von Neumann avait fait sien en la mettant au cœur de son architecture et de

¹⁴ Voir en particulier R.Carnap, *The logical syntax of language*, Routledge & Kegan Paul, reprint 1971.

son “*logical design*”¹⁵ : il faut distinguer le langage interne de la machine [en l’occurrence le langage binaire], du langage externe fait pour des humains, étant entendu que les deux doivent être consistants et complets. John von Neumann en avait ébauché la théorie dans ses études sur les automates fiables. Ce faisant, on désolidarise les évolutions DEDANS/DEHORS par un dispositif purement logique, immatériel, tout en restant cohérent, ce qui est une propriété essentielle pour la maintenance et l’évolutivité du système. Grâce à l’informatisation, il devient possible de passer d’une logique de liaisons points à points dont la complexité est en $O(N^2)$ en une logique de complexité linéaire, nonobstant la création d’une structure pivot qui concentre la complexité en un lieu précis que l’on peut organiser de façon ad hoc, au lieu de la laisser se disséminer et métastaser partout, ce qui la rend ingérable. Et c’est ce qu’on fait les équipes du RTE en mettant en oeuvre des middleware d’intégration.

Ce dispositif est une illustration de la notion de transducteur dont on a rappelé l’importance dans l’annexe du chapitre *Premières Définitions*.

Problèmes futurs

D’un strict point de vue systémique, sans entrer dans des considérations de politique énergétique hors de propos à ce stade, nous pouvons cependant signaler d’ores et déjà quelques problèmes qu’il faudra résoudre si l’on veut maintenir durablement les capacités du SE à leur niveau actuel.

Les énergies renouvelables et l’optimisation du réseau à l’échelle européenne

L’introduction dans le SE des énergies dites renouvelables comme le solaire, l’éolien, etc. rend la planification de l’offre plus difficile car ces énergies dépendent d’aléas climatiques localisés, particulièrement instables. Les fluctuations signalées sur le schéma de la figure 8 s’amplifient. L’effet induit du renouvelable est que initialement seule la demande était instable, alors que désormais, l’offre devient également instable. Pour préserver l’équilibre Offre/Demande dans des conditions économiques satisfaisantes, il faut échantillonner beaucoup plus finement la nature de l’offre, ce qui a un impact direct sur le système d’information : quantité de données + capacités de traitements beaucoup plus temps réel. La planification des plans de charges, [voir figures 6 et 8], faite par la gestion prévisionnelle la veille pour le lendemain [en J-1 comme on dit au RTE] est inadéquate avec ce type d’énergie. En terme de régulation, il faut consigner des ressources énergétiques immédiatement mobilisables qui ne peuvent être que thermiques ou hydrauliques. L’hydraulique étant limitée par la géographie et les contraintes d’environnement, il ne reste que le thermique ?! Le choix est donc on ne peut plus simple, soit on augmente les coupures, soit on augmente les infrastructures thermiques [et même beaucoup plus, si en parallèle on démantèle le nucléaire]. Par ailleurs, on ne contrôle plus la distance entre le lieu de la production et le lieu de la consommation. Il faut tenir compte des cartes d’ensoleillement, des vents. Le soleil est plutôt dans le sud, à la limite dans les déserts, là où personne ne peut vivre. Les vents sont plutôt au nord, voir le grand nord, où ils sont réguliers et puissants. Mais la population est plutôt concentrée dans la zone tempérée, là où il fait bon vivre. Acheminer l’énergie sur de longues distances, dans les technologies actuelles, augmente la dissipation et les pertes en ligne, à cause de la loi d’Ohm. Donc un problème pas du tout évident, avec de longues études de simulation pour mieux comprendre où l’on va mettre les pieds afin de maîtriser la transformation. Spéculer sur l’ignorance des usagers pour promouvoir des solutions économiquement déraisonnables, c’est créer un risque sociétal potentiel qui pourra exploser à tout moment.

¹⁵ Voir le détail et les références bibliographique dans le chapitre *Premières définitions*.

Les énergies renouvelables, couplées aux problématiques de dérégulation, dans le contexte européen, mettent en évidence les problèmes d'optimisation du réseau et de la complexité concomitante à cette optimisation.

Une première remarque tient au fait que la production ne se fait plus nécessairement au plus près des zones de consommation. La frontière DEDANS/DEHORS dont on a souligné l'importance devient poreuse. En conséquence, une plus grande quantité d'énergie va circuler dans le réseau qu'il va falloir gérer plus finement pour minimiser les risques de surcharge. Un parc éolien et/ou photovoltaïque produit de l'énergie, quelle que soit la demande, d'où la fausse bonne idée, contre intuitive, qu'il vaut mieux la consommer pour « économiser » le non renouvelable, thermique ou autre. Autant les vents sont relativement prévisibles, à plus ou moins 10% selon les statistiques actuelles, autant le solaire est lui largement imprévisible, toute chose égale par ailleurs. Un simple voile nuageux peut faire chuter le rendement d'une installation qui de toute façon suit le cycle du soleil, pas celui de la demande. Au niveau européen, actuellement, la production solaire est aux alentours de 25-30 Gigawatts, laquelle peut tomber à zéro en quelques minutes. Quand on sait que la puissance installée disponible en France est au maximum de 110 Gigawatts, on mesure l'ampleur du problème induit par les incertitudes, car pour éviter les coupures, il faut consigner des centrales, au cas où ?!

Une seconde remarque tient au fait que pour optimiser, et ceci n'est pas du tout évident pour le non spécialiste, il faut de l'information sur la situation globale du réseau à l'instant T, donc échanger de l'information, en grande quantité et à grande vitesse, entre les différents régulateurs. L'énergie produite, une fois raccordée au réseau, se propage de façon quasi instantanée vers les sites de consommation, pour autant que le réseau supporte la charge. Si la qualité des données échangées n'est pas garantie, cela peut induire des décisions erronées du régulateur, dangereuses quand on est proche des limites. On retrouve ici la question que posait J. von Neumann : « Qui garde les gardiens ? », car en cas de coupure, qui sera in fine le responsable, sachant que l'évènement générateur peut être très éloigné de la zone mise « dans le noir ».

Le désir « naïf » d'optimiser la boucle offre/demande en raccordant tout le monde, ce qui a toute les apparences du simple bon sens, s'accompagne mécaniquement d'une formidable augmentation de la complexité, laquelle va venir se matérialiser dans les systèmes d'information des différents régulateurs de façon à organiser cette complexité. Il faut prendre en compte que ce qui a été possible en France entre les systèmes régionaux SRC et le système national SNC, du fait de la centralisation et du monopole EDF, sera non transposable au niveau européen où un SNC européen est inenvisageable, politiquement parlant, dans l'état actuel de l'Europe, et très risqué au plan technique compte tenu de l'état de nos connaissances concernant la dynamique des systèmes de très grande taille avec des millions de variables d'état.

On voit, et cela est, au moins dans un premier temps, juste du bon sens, que l'optimisation va se traduire opérationnellement par plus de fluctuations, plus d'incertitudes, plus d'aléas imprévisibles. Donc, pour pallier le risque de coupures, une augmentation des capacités régionales est nécessaire, pour se mettre à l'abri des évènements externes, au cas où ?! Aucun homme politique soucieux de sa popularité n'aura le courage d'aller expliquer à ses concitoyens qui viennent de subir une coupure, que cela vient d'une décision d'optimisation du réseau au niveau du régulateur européen. Avoir de l'énergie moins coûteuse, mais avec des coupures, tel est le dilemme ?!

La situation ainsi engendrée est juste l'inverse de l'effet initialement recherché ; c'est, de plus, une magnifique illustration du théorème de Bellman, en commande optimale, qui dit que la somme des optimum locaux ne constitue pas un optimum global, et réciproquement.

Une troisième et dernière remarque tient à la dissymétrie de l'information nécessaire à la régulation, au sens large du terme. A l'époque d'avant la dérégulation, EDF disposait d'une information « parfaite » sur l'ensemble du système, avantage du monopole, et disposait de tous les moyens pour obtenir l'information indispensable à la bonne gestion de l'ensemble. Quand on dérégule, l'information est de moins en moins parfaite, ce qui nécessite la mise en place d'une instance de régulation indépendante, en l'occurrence la CRE [Commission de Régulation de l'Energie]. Se pose alors un nouveau problème qui est celui de la compétence des experts qui siègent dans cette commission : où vont-ils se former ? Qui va arbitrer les litiges, et avec quelle autorité ? Sont-ils vraiment indépendants ? Les problèmes sont innombrables et source de conflits insolubles qui vont ouvrir la voie à une judiciarisation dont les seuls bénéficiaires seront les avocats, le tout sur le dos des usagers car c'est un nouveau centre de coûts.

Au niveau des états, on peut imaginer que l'on puisse trouver un compromis, avec en dernier recours l'Etat arbitre. Mais qu'en est-il au niveau européen ? L'information est dans le meilleur des cas imparfaite, éventuellement incomplète, mais elle peut aussi être biaisée, voire manipulée comme on l'a vu avec l'affaire ENRON. Qui peut garantir que les dirigeants sont des saints et ne commettront jamais d'indélicatesses, surtout si leur rémunération est indexée sur le cours de bourse de leur entreprise. Dans ce cas, la notion même d'optimisation n'a plus de sens. On entre dans une logique comme celle du « doit invisible du marché » dont on vient d'expérimenter les conséquences.

La taille du système, les incertitudes liées à la complexité humaine, elles-mêmes liées aux nombre d'acteurs organisationnels et humains, et à leur diversité culturelle, les aléas liés à l'environnement de plus en plus étendu, aux interactions ... tout cela va créer un horizon qui, si on le franchit, va se traduire par une perte de contrôle. La frontière contrôlable/non contrôlable devient floue, et de plus elle s'élargit en une sorte de "*no mans land*" où tout peut arriver, avec l'accroissement de complexité résultant des couplages.

☞ En conclusion, optimiser, certes, mais jusqu'où ? Seule la simulation peut éventuellement apporter une réponse dans l'état de nos connaissances.

Le photovoltaïque domestique

Demander à chaque foyer de s'équiper de panneaux photovoltaïques, là où c'est possible, revient à faire de chacun un producteur potentiel. Soit l'énergie produite est consommée et/ou stockée sur place, à l'aide de batteries ou de tout autre moyen compatible avec l'usage domestique [air comprimé ?!], soit elle est livrée à ERDF ou à un autre opérateur [il y en a plus de 150] ; mais alors le réseau fonctionne à l'envers. Il faut réaménager le réseau de distribution local/régional.

Le courant produit dans ces conditions est de qualité variable. S'il s'agit de chauffer la maison ou de faire cuire des aliments, ce n'est pas un problème. Par contre, s'il s'agit d'alimenter des équipements électroniques qui demandent un courant de haute qualité, il faut prévoir des onduleurs qui sont des équipements coûteux. On voit donc se dessiner une double alimentation énergétique : celle pour des équipements électroniques sensibles avec un contrat de service en bonne et due forme [téléphones, ordinateurs, surveillance et sécurité, etc.], et celle du tout venant domestique [chauffage, éclairage, etc.], un peu comme l'eau potable et l'eau non potable. Sans oublier que qui dit "*smart grid*", dit ipso facto équipements électroniques haut de gamme partout, dit aussi maintien en condition opérationnelle et contrat de service car bien évidemment, cela ne marchera pas tout seul tout le temps.

En tout état de cause, on comprend bien que le problème global n'est pas aussi simple qu'il en a l'air si l'on intègre tous les éléments collatéraux, y compris le changement d'habitudes des 30 millions d'usagers.

Européaniser le réseau – Le problème de la gouvernance

C'est une forme de « mondialisation » énergétique, une mutualisation de plus en plus large au niveau européen, ce qui intuitivement peut paraître bénéfique pour l'utilisateur consommateur, mais comme nous l'avons déjà signalé au niveau français revient aussi à mutualiser les risques, et comme les chocs énergétiques se propagent quasiment à la vitesse de la lumière, cela veut dire qu'un incident au Danemark peut engendrer un black-out dans le sud de l'Italie en quelques secondes. Il faut donc harmoniser les modèles des différents gestionnaires de réseaux européens, a priori sous l'autorité de la Commission Européenne, si tant est qu'elle en ait la compétence, ou via une agence en charge de la régulation globale Europe ?! C'est de toute évidence un travail gigantesque de très longue haleine qui ne peut pas être arbitrée sur des critères politiques, car le problème est essentiellement technique. Le juge de paix, ce sont les lois de la physique qui ne peuvent être ni aménagées au gré des humeurs, ni a fortiori abrogées par les parlements. Le travail ne peut donc pas être effectué par des fonctionnaires, aux compétences systèmes hypothétiques, et des commissions d'experts nommés par les gouvernements sensés les « conseiller » dont on sait qu'ils ont souvent une éthique à géométrie variable. On en revient ici à une analyse faite par Jay Forrester qui suite à son expérience du projet SAGE, avait décidé d'aller enseigner la *System Thinking* à la Sloan School du MIT, car tout cela nécessitera une transformation des comportements, donc beaucoup d'explications, de formations et de formateurs convaincus et convaincants ; même avec les facilités du Web, c'est une tâche pédagogique difficile, et de longue haleine, car ce sont des millions de consommateurs européens qu'il faudra convaincre.

Passer outre et afficher un volontarisme démagogique de façade pour complaire à des opinions publiques désinformées et qui n'y comprennent plus rien, ou pire à des lobbys industriels et/ou juridiques, en s'abritant sous le parapluie du principe de précaution [une vraie rente pour les cabinets d'avocats, car source intarissable de conflits], cela revient à faire fi des lois de la nature comme de celles de l'ingénierie des grands projets. Comme mentionné dans la figure 4, la complexité ainsi engendrée risque d'aller bien au-delà de ce que les ingénieurs et les équipes les plus expérimentées savent raisonnablement organiser et maîtriser. La gouvernance technique ne peut pas être subordonnée au pouvoir politique car alors le risque de refaire Tchernobyl est avéré. Le chaos est certain, il suffit d'attendre ...

Il y a de toute évidence un optimum en taille de système au-delà duquel il est problématique de s'aventurer. Au-delà d'un certain seuil, la mutualisation devient elle-même problématique. Même avec un « bon » modèle global qui à l'heure actuelle n'existe pas, il n'est pas sûr que cela nous soit réalisable compte tenu des mentalités et de la diversité des acteurs, beaucoup de droits, peu de devoirs, sauf à évoluer vers une société autoritaire. Seules des simulations approfondies, à inventer, pourront nous donner quelques éclairages [si l'on peut dire !].

Vouloir européaniser le réseau et les échanges énergétiques signifie, opérationnellement parlant, mettre en place une gouvernance du système de systèmes ainsi constitué sur un périmètre organisationnel de très grande taille, avec de nombreuses parties prenantes aux intérêts contradictoires. C'est donc, mécaniquement, fabriquer de la complexité organisationnelle et humaine, un problème déjà très bien identifié par Jay Forrester à l'époque du projet SAGE, mais complexité encore bien mal comprise comme cela a été rappelé dans l'*Introduction historique*, chapitre 1. Pour le réseau de transport, c'est une instance supranationale qui ne peut pas se comporter comme une société multinationale à cause des politiques énergétiques et des enjeux stratégiques des états. Il serait naïf, voire imprudent, d'imaginer que tout cela va pouvoir fonctionner sans risque additionnel.

Une première difficulté vient de la disparité des cycles décisionnels liés d'une part à la physique et à l'ingénierie du réseau, et d'autre part ceux des décisions humaines et des choix politiques qui peuvent varier au gré des majorités parlementaires. Côté système on est dans le temps long, avec des investissements lourds, alors que coté humain c'est le temps court qui prévaut. Une décision politique, comme celle de la chancelière allemande, de sortir du nucléaire, après la tragédie de Fukushima, se prend en quelques semaines, au pire en quelques mois, mais l'impact sur le système et son écosystème technologique va se développer sur des décennies, et à partir d'un certain seuil, sans retour arrière possible, compte tenu des cycles d'investissements. On commence à en voir les premières conséquences en Allemagne.

Une seconde difficulté vient des déphasages psychoculturels des acteurs. Dans une situation à risque, un français individualiste ne réagira pas comme un allemand habitué au travail collectif et à la culture du compromis. Dans un contexte multiculturel, il ne peut pas y avoir de « centre » au sens habituel du terme. Si le niveau politique fluctue, les acteurs nationaux resteront dans l'expectative, et dans le cas pire, c'est la défiance et le repli sur soi qui prévaudront. Toute décision doit être collective, ce qui peut poser problème dans les situations où il faut réagir vite. Le management des risque est un aspect fondamental d'une gouvernance bien comprise, il est ici à son maximum d'intensité, avec bien peu de retour d'expérience pour le moment. Le travail collectif est un mode opératoire bien connu des états-majors de gestion des crises, comme ceux de l'OTAN. Etre efficace dans ce genre de situation requiert des formations ad hoc, une langue commune comme celle définie dans le Military Standard, *Common warfighting symbology*, des méthodes de travail communes comme celles définies par l'OTAN avec les guides MEDO/MARS, etc. ... etc. ; bref, tout un apprentissage et une qualification indispensable pour ne pas occasionner de catastrophes.

Enfin, troisième difficulté, il y a un vrai problème de compétences requises pour travailler à ce niveau d'abstraction, bien loin des réalités du terrain. La tentation de la fuite dans le virtuel est un vrai risque qui peut faire oublier la nature physique des phénomènes hautement énergétiques dont le réseau est le siège, un peu comme la macroéconomie versus l'économie réelle façon Schumpeter, toutes choses égales par ailleurs. Prendre la décision de raccorder au réseau un parc éolien de grande puissance, c'est ipso facto s'assurer que la puissance ainsi libérée dans le réseau est compatible avec la capacité de transport, en particulier celle des maillons faibles ; l'un ne va pas sans l'autre. Aussi fidèle que puisse être les représentations de la situation du réseau sur les écrans de contrôle du système, il ne faut jamais oublier la réalité physique. Derrière un écran, la perception du risque est différente ; c'est un phénomène psychologique bien connu des métiers à risques qui peut engendrer des comportements déviants, ou une prise de risque inconsidérée. A tout le moins, une bonne formation à la *System Thinking*, est indispensable, ce qui permet de se familiariser avec les phénomènes contre intuitifs engendrés par les interdépendances et les rétroactions dont le système est le siège.

La gouvernance d'un ensemble aussi vaste est un acte architectural fort. Si les rôles ne sont pas bien définis c'est l'anarchie garantie, sur un volcan énergétique. La gouvernance est le centre nerveux du système, et d'une certaine façon un aspect primordial de sa mémoire long terme. La symbiose opérationnelle des acteurs, l'esprit d'équipe, doivent être aussi parfaites que possible, en restant alignées sur la réalité physique sous-jacente qui a ses lois propres qui elles, sont intangibles. Elle doit être organisée pour résister aux lobbys de toutes sortes qui ne vont pas manquer de s'exercer sur pour tirer de ce nouveau centre de décisions des avantages, de leur point de vue. Chacun des facteurs PESTEL [Politique, Economique, Social, Technologique, Ecologique Légal] va engendrer différents types de pression. En cas de conflits, inévitables à ce niveau, il faudra arbitrer et rendre public les arbitrages pour garder la confiance des parties prenantes et derrière elles, celle des usagers. Les lois de la physique font que l'interconnexion des réseaux crée un objet physique unique de très grande taille

qu'on ne peut plus contrôler, chacun à sa guise, sous peine de catastrophe, un peu comme un véhicule qui aurait plusieurs volants. La coopération, le sens du bien commun, deviennent obligatoires, mais comment garantir ces comportements qui relèvent de l'éthique. C'est à nouveau le dilemme de von Neumann : « Qui garde les gardiens » ?!

☞ Tout cela est plus facile à dire qu'à faire, car on manque encore du recul nécessaire pour bien juger, mais il n'y a pas d'échappatoire possible : il faut s'organiser pour coopérer, bien réfléchir, expliquer, agir ; mais ne surtout pas fuir dans le virtuel, fut-il qualifié de *Smart* !

Pour conclure ...

La plus grande leçon du SE, du point de vue systémique, est sans doute dans l'organisation des niveaux de régulations et dans la connaissance intime du système. On a vu que le risque est lié à la quantité d'énergie à réguler. Plus la quantité d'énergie est élevée, plus la compensation est difficile à mettre en œuvre dans un délai requis de plus en plus court, sauf à garder en réserve des stocks énergétiques de consigne en contradiction avec le but recherché. Au-delà d'un certain seuil, il faut scinder de façon à obtenir des « paquets » énergétiques raisonnables dont seule une faible partie fera l'objet de compensation.

Pour être concret, c'est juste un exemple, si 10 régions laissent chacune 10% de leur quota de production consommation, et jamais plus, à réguler par un régulateur de niveau supérieur, celui-ci hérite d'un quota cumulé équivalent à ce que l'on sait faire, selon un raisonnement proposé par H.Simon¹⁶. Mais pour que cela marche, il faut que le principe de subsidiarité que l'on vient de poser soit strictement respecté par les acteurs. Il ne faut pas que parmi les dix, un ou plusieurs laissent filer en pensant que l'instance supérieure pourra toujours se débrouiller, et qu'inversement, le niveau supérieur ne vienne pas s'immiscer dans ce qui ne le regarde pas et où il n'est pas qualifié ; ou pire, passer des accords de compensation sans en informer les autres. Chacun localement doit être libre, certes, mais surtout responsable. Cette règle de subsidiarité est en fait une variante de la doctrine chinoise de la non-intervention, le wou wei des taoïstes qui est tout le contraire d'un « laisser faire » ; et comme nos amis chinois ont une science politique ancestrale, et une capacité à gérer des masses humaines bien au-delà de ce que nous savons faire en Europe, peut-être est-ce là un message de sagesse qu'il nous faut mettre en œuvre également dans nos pratiques d'ingénierie. C'est d'ailleurs ce que nous enseignent les architectures en couches qui nous permettent d'organiser les millions de lignes de code dont sont faites nos systèmes d'exploitation, nos protocoles de télécommunication, et bien d'autres choses ... Par un fait étrange, c'est dans ce contexte des années 70-80 que l'on a commencé à vraiment bien comprendre les vertus des modèles grâce au déploiement de la technologie informatique, à l'époque encore adolescente, qui permet de les explorer par simulation. Au niveau de maturité le plus élevé, dans le modèle CMMI, la qualité n'est plus visible en tant qu'organisation car elle est partout, dans toute les têtes.

Bien d'autres aspects de la systémique pourraient être illustrés par le système électrique, comme la prise en compte des aspects environnementaux, c'est-à-dire le DEHORS du SE. Le SE est contraint par toutes sortes de facteurs qu'il est commode de regrouper sous le sigle PESTEL¹⁷ [Politique, Economique, Social, Technologique, Ecologique Légal]. Chacun de ces facteurs pèse sur les destinées du SE. La production d'électricité a d'abord été une affaire privée. En 1945, c'est devenu un enjeu national. Dans les années 2000, suite aux lois de dérégulation et aux directives européennes, l'ensemble EDF/GDF a été éclaté en plusieurs composantes. Un opérateur de gestion du réseau de transport a été créé : RTE [Réseau de Transport de l'Énergie], devant assurer un service équitable entre tous les producteurs

¹⁶ Cf. *Sciences of the artificial*, chapitre 8, déjà cité.

¹⁷ Voir en particulier Andrew Gillespie, *Foundation of economics*, Oxford University Press, 2011, et le site [NB : l'ensemble du lien est intéressant] : <http://www.kantakji.com/fiqh/files/env/ty3.pdf> ; avec un extrait PESTEL

d'énergie, lequel opère sous la supervision de la CRE, Commission de Régulation de l'Energie, créée en mars 2000, qui compte neuf membres nommés. Le facteur écologique joue désormais un rôle majeur. Il est devenu presque impossible de déployer de nouvelles infrastructures comme des lignes THT qui permettent la régulation globale, alors que la pression pour interconnecter les pays et les régions est toujours plus forte, ce qui fabrique mécaniquement de l'instabilité à cause de ces nouveaux couplages. Il faut optimiser les infrastructures actuelles grâce à la simulation de plus en plus performante, grâce aux moyens de calculs intensifs désormais disponibles. Le nucléaire est devenu un enjeu de société qui varie selon les majorités politiques du moment, soit des cycles de cinq ans, alors que les cycles d'ingénierie, démantèlement inclus, et d'amortissement économique, se comptent en décennies ; environ 100 ans pour les EPR en cours de construction. C'est une nouvelle source d'instabilités dont il faudrait s'assurer que leur somme ne va pas devenir préjudiciable à la qualité du service énergétique, voire des risques de sûreté, et engendrer des gaspillages. Mais quoi que l'on puisse décider, il ne faut jamais oublier que dans cette gigantesque machine énergétique, organisée au mieux de nos connaissances et de nos savoir-faire, c'est toujours la nature qui impose ses contraintes, y compris les contingences humaines. Elle reste une « petite machine » à l'échelle de la machine énergétique terrestre et des forces dévastatrices que la nature peut déchaîner avec les ouragans ou les tremblements de terre.

Là encore, le seul recours pour y voir clair est la simulation de scénarios énergétiques soumis à l'arbitrage des usagers, pour juger en toute sérénité. Mieux vaut se donner les 3-5 ans nécessaires à leur validation plutôt que de s'engager dans des voies et des investissements dont personne aujourd'hui ne peut garantir que ce ne seront pas des impasses.

La complexité des systèmes comme le SE engendre des contraintes « citoyennes » comme on aime dire aujourd'hui, voir éthique. L'opérateur du système, aidé par le régulateur, doit pouvoir expliquer comment « ça marche », dans des termes compréhensibles par une majorité de consommateurs qui, on peut l'espérer, ont la maturité suffisante pour en mesurer les enjeux, ce qui n'était pas le cas il y a 20-30 ans. Aujourd'hui, 80% d'une tranche d'âge a le niveau baccalauréat ! Il faut que l'information soit ouverte pour que des organismes indépendants puissent s'en saisir et donner un avis contradictoire, en termes de risques, comme cela est requis dans les procédures qualité. Si on arrête le nucléaire, il n'y a que deux alternatives : a) compenser par d'autres énergies et/ou b) réduire drastiquement la consommation, tout en sachant que le besoin va augmenter, ne serait-ce que par la démographie. Mettre du nucléaire dans un pays qui n'a pas la maturité PESTEL [au sens compétence, qualification dûment validée], ce que les économistes américains¹⁸ appellent parfois la « montée en grade » [de «graduate»] est un risque qu'il vaut mieux éviter. Refuser la création d'infrastructures de production et/ou d'interconnexion, c'est accepter, pour le bien commun, de réduire volontairement ses besoins et/ou de subir des coupures d'alimentation.

Illustrée de façon ad hoc, avec des modèles pédagogiques simples, que la technologie informatique permet aujourd'hui d'animer de façon réaliste, la systémique peut aider le citoyen, le décideur politique, l'élu local, à mieux appréhender le monde complexe qui est désormais le notre, à éclairer leur capacité de discernement et leur sens des responsabilités.

☞ Mieux vaut parier sur l'intelligence que sur l'idéologie, dont on a vécu les ravages à plusieurs reprises au 20^{ème} siècle.

¹⁸ Voir les travaux de C.Reinhart et K.Rogoff, et leur dernier livre, *Cette fois, c'est différent – Huit siècles de folie financière*, Pearson, 2009 au Princeton UP et 2010 en France.

Post scriptum : on ne peut s'empêcher de faire un parallèle entre le SE et le système financier qui s'est progressivement mis en place après les premières mesures de dérégulations qui commencent avec la non convertibilité du dollar prise par le président Nixon, dans les années 70. Ce sera l'objet de l'annexe A1 : *Un anti-pattern systémique – La science économique et la finance dérégulée*.

NB : Pour l'anecdote, rappelons que dans le cas du scandale ENRON¹⁹ aux Etats-Unis, les financiers escrocs à la tête de l'entreprise, avaient réussi à vendre de l'énergie qui n'existait pas, avec la complicité du cabinet de conseil Arthur Andersen qui falsifiait les comptes, dont les usagers californiens faisaient les frais en subissant de nombreuses coupures. Depuis qu'ils sont en prison, tout est rentré dans l'ordre. Arthur Andersen a disparu du paysage, décrédibilisé par le scandale. On ne peut pas jouer au poker avec les lois de la physique comme on peut le faire impunément dans la finance dérégulée.

¹⁹ La manipulation est bien expliquée dans le livre du prix Nobel Joseph Stiglitz, *Quand le capitalisme perd la tête*, Fayard Poche.