Université Paris Est Créteil Serge Lhomme

Maître de conférences en géographie http://serge.lhomme.pagesperso-orange.fr/ serge.lhomme@u-pec.fr Introduction

2 Les infrastructures critiques

3 Les outils de simulation et la gestion des risques

- Introduction
- 2 Les infrastructures critiques
- 3 Les outils de simulation et la gestion des risques



# Généralités sur les infrastructures critiques

Les infrastructures critiques font l'objet d'une attention particulière depuis quelques années dans la plupart des pays industrialisés.

Il n'existe pas une définition unique reconnue, les définitions varient ainsi selon les pays et la plupart de ces définitions restent très générales.

#### Définition (directive européenne)

Un point, un système ou partie de celui-ci, qui est indispensable au maintien des fonctions vitales de la société, de la santé, de la sûreté, de la sécurité et du bien-être économique ou social des citoyens, et dont l'arrêt ou la destruction aurait un impact significatif du fait de la défaillance de ces fonctions.

### Généralités sur les infrastructures critiques

#### Inventaire à la Prévert

La notion d'infrastructure critique s'est imposée, dans toute son imprécision et ses variantes nationales, comme une manière de formuler un ensemble de questions nouvelles posées aux pays industrialisés.

Parmi les listes établies par différents pays, certaines infrastructures reviennent de manière récurrente :

- les télécommunications,
- les systèmes de génération d'électricité,
- les systèmes de stockage et de transport du gaz et du pétrole,
- la banque et la finance,
- les transports de personnes,
- l'approvisionnement et la distribution de l'eau,
- les services d'urgence, et ceux qui assurent la continuité du gouvernement.



- Introduction
- 2 Les infrastructures critiques
- 3 Les outils de simulation et la gestion des risques

#### Historique

Bien que les États-Unis, de même que l'ensemble des pays industrialisés, aient traditionnellement porté une attention particulière au bon fonctionnement de leurs principales infrastructures, la notion « d'infrastructure critique » n'est apparue dans les textes officiels que vers le milieu des années 1990.

En fait, il semble qu'une série d'événements inédits ait induit un changement de perspective chez les dirigeants américains de l'époque (le premier attentat terroriste sur le World Trade Center (1993), celui d'Oklahoma City (1995), et l'attaque au gaz sarin dans le métro de Tokyo (1995)) seraient à l'origine de la Presidential Decision Directive destinée à organiser une politique pour contrer le terrorisme sur le sol américain.

Le terme critical national infrastructure apparaît dans ce texte, sans pour autant y être défini, mais les allusions aux aéroports, aux gares, aux autoroutes, aux lieux de circulation de masse, aux installations nucléaires ou aux réseaux de distribution de l'énergie donnent une première idée du sujet.

#### Historique

Les choses vont commencer à se préciser lorsque le Président mettra en place une commission spécifique pour traiter de ces questions en juillet 1996.

Cette commission fournit en effet une première définition du sujet, une première liste des infrastructures dignes d'intérêt, introduit un minimum de catégories d'analyse, et évoque les complications possibles liées au statut et à la propriété (public ou privé) des infrastructures concernées.

En termes de définition, les infrastructures visées sont si vitales que « leur incapacité ou leur destruction affaiblirait considérablement la défense ou la sécurité économique des États-Unis ».

Celles qui sont explicitement citées sont « les télécommunications, les systèmes de génération d'électricité, les systèmes de stockage et de transport du gaz et du pétrole, la banque et la finance, les transports de personnes, l'approvisionnement et la distribution de l'eau, les services d'urgence et ceux qui assurent la continuité du gouvernement ».

#### Historique

Deux catastrophes, de natures fort différentes, en 2001, vont alors toutes deux influer sur l'acception américaine de la notion d'infrastructure critique et en accélérer la diffusion.

La première a lieu en mars : c'est en fait le point culminant de ce que l'on a appelé la « crise énergétique californienne ». La deuxième est beaucoup plus soudaine et dramatique : c'est l'attentat terroriste du 11 septembre 2001 sur le World Trade Center.

Quelques jours après l'attentat, le Président Bush crée un Office de la sécurité intérieure dont une des missions est de « coordonner les efforts pour protéger les États-Unis et ses infrastructures critiques des conséquences des attaques terroristes ». À cette occasion, la liste des infrastructures critiques est allongée par les sites nucléaires, le secteur agricole et l'organisation de manifestations exceptionnelles (jeux olympiques d'hiver Salt Lake City en 2002).

Une mutation profonde d'envisager le risque

Le risque est historiquement lié à l'existence d'un aléa localisable. En effet, les aléas peuvent être dans leur grande majorité localisés en fonction de leur intensité et de leur probabilité d'occurrence.

Or, la notion d'infrastructure critique se développe pour faire face à un aléa très particulier. L'aléa terroriste possède en effet la particularité de ne pas être localisable a priori. Il peut frapper n'importe où.

Il convient alors d'établir des plans de prévention et de protection ne reposant pas nécessairement sur une connaissance précise de l'aléa. Il convient plutôt de privilégier une profonde connaissance des enjeux et ce en fonction de leur importance pour la société.

Une infrastructure critique ne se définit alors finalement que par l'intensité des conséquences de ces dangers, sans référence à des probabilités d'occurrence. On quitte le domaine du probable pour celui du possible.

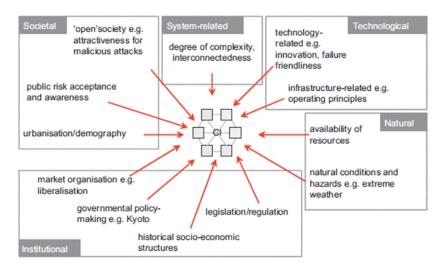
Une mutation profonde d'envisager le risque qui n'est pas sans soulever des questions

L'une des raisons, sans doute, à la fois du succès de la notion et de ses difficultés pratiques de mise en oeuvre, tient au fait qu'elle recense sans cesse de nouvelles sources de danger.

Or si l'on recherche les causes possibles de toutes les catastrophes imaginables, n'importe quoi peut être qualifié d'infrastructure critique : il suffit ainsi que par un « effet domino » non prévu ou par une anticipation volontaire de nature malveillante, pour transformer un incident en catastrophe.

Connaissant l'interconnexion croissante des réseaux ou l'imagination des terroristes, qu'est-ce qui permet d'éliminer a priori tel ou tel réseau, site ou lieu public du recensement de l'ensemble des infrastructures critiques nationales, si on ne peut pas être certain qu'il n'y adviendra pas un jour une catastrophe d'une certaine ampleur?

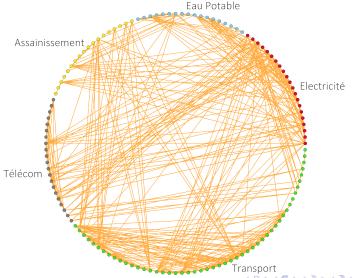
#### De multiples menaces



De multiples menaces : l'exemple des inondations (UK)

Infrastructures critiques	Nombre de sites exposés	Pourcentage des sites		
Hôpitaux	90	6%		
Maisons de santé	1028	7%		
Ecoles	1796	7%		
Centres de santé	2971	10%		
Prisons	19	13%		
Stations de police	397	13%		
Stations d'ambulance	172	14%		
Pompiers	172	14%		
Sites électrique	265	15%		
Gares	8423	17%		
Sites Gaz	512	28%		
Assainissement	23	58%		

Des infrastructures critiques interdépendantes : un pléonasme



#### Des infrastructures critiques interdépendantes : un pléonasme

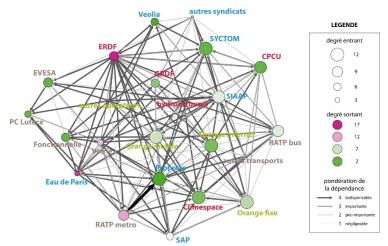


Figure 4-28 : Représentation des interdépendances des services urbains parisiens selon la spatialisation force-atlas obtenue avec le logiciel Gephi (Toubin et al., 2012f)

#### Gestion des infrastructures critiques

Problématique	Description cursive			
Echelle temporelle	Les dynamiques des infrastructures varient énormément : de la milliseconde (pour perturber un réseau électrique) à des décennies (pour construire une nouvelle infrastructure).			
Echelle spatiale	Les échelles spatiales se déclinent du composant élémentaire (au niveau technique) à l'échelle internationale (au niveau économique ou politique).			
Comportement non linéaire	La défaillance d'un composant peut engendrer un dysfonctionnement important de l'ensemble de l'infrastructure, c'est-à-dire des effets dominos, des défaillances en chaîne ou en cascade.			
Social	Ces infrastructures sont des systèmes sociotechniques, leur fonctionnement dépend donc fortement de facteurs humains.			
Gouvernance	Les gouvernements par leurs décisions vont fortement influencer le fonctionnement des infrastructures.			
Economique	Les politiques de marchés dans lesquelles sont majoritairement impliquées ces infrastructures influent directement sur leur fonctionnement. Cette problématique pose la question de leur mission de service public alors même que ces infrastructures sont généralement privées.			
Organisationnel	Que ce soit en période « normale », de crise ou de remise en service, les procédures mises en place au sein de l'infrastructure vont profondément influer sur son fonctionnement.			

Une littérature désormais abondante

La littérature concernant les infrastructures critiques connait un développement important depuis les années 2000. Dans un état de l'art approfondi, il est fait référence à 55 articles, rapports ou normes pour la période 1999-2010 (Yusta et al., 2011).

Electricité	Gaz	Pétrole	Assainissement	Eau potable	Communication	Informations	Régulations	Routes	Ferroviaire	Activités Humaines	Banques
14%	6%	3%	6%	7%	9%	5%	12%	5%	5%	11%	8%

- Introduction
- 2 Les infrastructures critiques
- 3 Les outils de simulation et la gestion des risques

Des infrastructures critiques par excellence : les blackouts

Date	Lieu	Durée	Personnes affectées	Causes du « blackout »
14 Aout 2003	USA (NYC)	16	50 (Mio)	Problème de maintenance
28 Sept. 2003	Italie	18	56 (Mio)	Surcharge du réseau
12 Juillet 2004	Athènes	3	5 (Mio)	Voltage collapse (écroulement de tension)
18 Aout 2005	Java-Bali	7	100 (Mio)	Problème sur une ligne du réseau de transmission entrainant des défaillances en chaîne sur le réseau
4 Nov. 2006	Europe (ouest)	2	15 (Mio)	Surcharge du réseau
10 Nov. 2009	Brésil	6	60 (Mio)	Court-circuit sur une ligne puis défaillance en chaîne

Des infrastructures critiques par excellence : Le cas d'une inondation à Paris

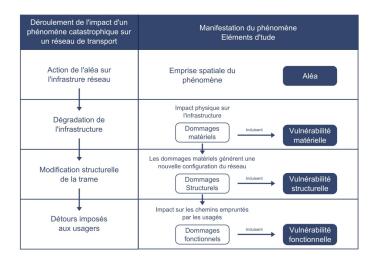
La distribution de l'électricité pourrait être largement affectée avec près d'un quart des infrastructures de transformation électrique inondées ou coupées préventivement et plus de 1.5 million de clients qui pourraient voir leur électricité coupée.

Les transports publics pourraient être affectés sur une large portion avec près de 140km du réseau de métro fermés préventivement sur 250. C'est surtout 6 mois d'indisponibilité dans certaines zones.

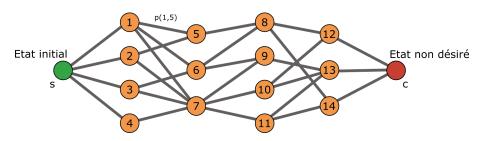
Le réseau routier pourrait être bloqué en de nombreux points : les ponts traversant la Seine interdits à la circulation du fait de leur fragilisation rendraient impossible le passage de la rive droite à la rive gauche.

L'alimentation en eau potable pourrait être interrompue dans la périphérie de Paris où plus de 5 millions d'abonnés pourraient subir des coupures d'eau prolongées et 1.3 million une dégradation de sa qualité.

Différents niveaux d'analyse : l'exemple du réseau de transport



Les fondamentaux de l'analyse de réseaux



Parmi les scénarios de défaillances possibles, on s'intéressera aux scénarios les plus probables. En prenant les logarithmes des probabilités, identifier ces scénarios revient à chercher le flow maximum dans un graphe.

Les fondamentaux de l'analyse de réseaux

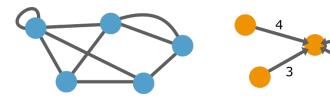
Beaucoup de problèmes d'optimisation combinatoire (discrète) peuvent être formalisés sous la forme de graphes. Les algorithmes développés dans ce cadre sont fondamentaux.

- Algorithme de Ford-Fulkerson pour le problème de flot maximum.
- Algorithme Dijkstra pour les plus courts chemins.
- Algorithme de Bellman pour les plus courts chemins dans des graphes comportant des poids négatifs.
- Algorithme de Floyd-Warshall pour calculer tous les plus courts chemins.
- Network simplex pour le problème de flot de coût minimum.

#### Les fondamentaux de l'analyse de réseaux

Un graphe simple est défini par un couple G=(V,E), où E est un ensemble de paires d'éléments de V avec  $V\neq\emptyset$ . Les éléments de V sont appelés noeuds ou sommets, les relations E sont appelées arcs ou arêtes. Un graphe simple n'a pas d'arêtes multiples et pas de boucles.

Un graphe peut être orienté (dirigé) ou non. Un graphe peut être pondéré (sur les arcs ou sur les noeuds) ou non. On note p(v) le poids d'un sommet v et p(v,v') le poids d'une arête (v,v'). Un sous-graphe G' de G est constitué d'un sous-ensemble de noeuds et/ou d'arcs G.



Les fondamentaux de l'analyse de réseaux

Deux sommets connectés par la même arête sont adjacents (sommets adjacents ou voisins). De même, deux arcs possédant une extrémité commune sont adjacents (arêtes adjacentes).

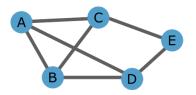
Une matrice d'adjacence est une matrice carrée, notée A, de dimensions  $|V| \times |V|$ , dont chaque élément  $A_{ij}$  est égal au nombre d'arêtes incidentes aux sommets i et j (pour un graphe simple non pondéré  $A_{ij} \in \{0,1\}$ ). Dans le cas d'un graphe pondéré, chaque élément est égal à la somme des poids des arêtes incidentes.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} A^{2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} A^{2} + A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

#### Les fondamentaux de l'analyse de réseaux

Dans un graphe non orienté, une chaîne reliant x à y, notée  $\mu(x,y)$ , est définie par une suite finie d'arêtes consécutives, reliant x à y. Pour un graphe orienté, on parle de chemin. La distance d(x,y) entre x et y est la longueur du plus court chemin entre ces sommets. Dans un graphe non pondéré cela correspond au nombre d'arcs du plus court chemin.

Un graphe est connexe s'il existe un chemin entre tout couple de sommets. Quand on parle de connexité pour un graphe orienté, on considère le graphe non-orienté correspondant. Un graphe orienté sera dit fortement connexe si, pour tout couple de sommets (u,v) du graphe, il existe un chemin de u à v et de v à u.





Les fondamentaux de l'analyse de réseaux

|V|, |E| et p correspondent respectivement au nombre de sommets, d'arcs et de composantes connexes.

Le nombre cyclomatique (nombre maximum de cycles indépendants) :

$$u = |E| - |V| + p$$

Indice alpha (connectivité) :

$$\alpha = \frac{2u}{(|V|-1)(|V|-2)}$$

Le diamètre :

$$D = Max(D_{i,j})$$

Indice Pi (étirement, linéarité) :

$$\pi = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} D_{i,j}/D = L_G/D$$

Les fondamentaux de l'analyse de réseaux

Le degré d'un sommet i :

$$Deg_i = \sum_{j=1}^n A_{i,j}$$

Le degré pondéré d'un sommet i :

$$WDeg_i = \sum_{j=1}^n p(i,j) \times A_{i,j}$$

La centralité intermédiaire d'un sommet i :

$$C_i = \sum_{s,t,s\neq t}^n \frac{\sigma_{s,t}(i)}{\sigma_{s,t}}$$

Les fondamentaux de l'analyse de réseaux

L'éloignement d'un sommet i :

$$E_i = \sum_{j=1}^n D_{i,j}$$

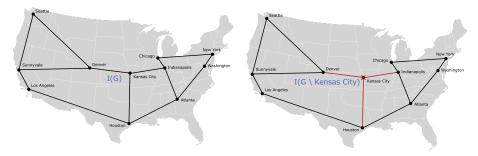
L'éloignement moyen d'un graphe G :

$$E_G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{i,j}}{n \times (n-1)}$$

La proximité d'un graphe G :

$$P_G = \sum_{i,j,i \neq j}^{n} \frac{1}{D_{i,j}}$$
 ou  $P_G = \frac{1}{\sum_{i,j,i \neq j}^{n} D_{i,j}} = \frac{1}{L_G}$ 

#### Evaluer une "vulnérabilité" élémentaire



Vulnérabilité élémentaire (i) =  $I(G) - I(G \setminus i)$ 

Si 
$$I(G) = I(G \setminus i) \Rightarrow Vel(i) = 0$$

On s'attend à 
$$I(G) > I(G \setminus i) \Rightarrow Vel(i) > 0$$

Pour respecter cette règle, on utilisera parfois l'opposée des indicateurs classiques.

#### Les fondamentaux de la programmation en Python

- # Affectation et premiers calculs
- # Création de listes
- # Ajout d'une ligne
- # Affichage d'un texte
- # Les boucles
- # Les tests

Les fondamentaux de la programmation en Python

```
# Import d'une bibliothèque
```

# Appel d'une bibliothèque

```
# Création d'un graphe
```

# Ajout d'arcs et de noeuds

# Calcul d'un indicateur

# Plus courts chemins

```
import numpy
import networkx as nx

b = numpy.array(a)
a = list(b)

G = nx.graph()
G.add_edges_from(liste)
G.remove_node(10)
deg =nx.degree(G)
sp = nx.shortest_path(G, 15, 45)
spl = nx.shortest_path_length(G, 15, 45)
```

#### Attention

Le = ne copie pas les listes. Pour copier une liste b = a[:]

Les fondamentaux de la programmation en Python

Python a été conçu pour être un langage lisible. Il vise à être visuellement épuré. C'est pourquoi il est très apprécié par les scientifiques (non informaticiens). Il se caractérise alors par un système d'identation.

```
Création de listes : a=[1,2,3] ou a=[(1,2,3),(1,2,3)]
Ajout d'une ligne (concaténation) : a=a+[2] ou a=a+[(1,2,3)]
Création d'un texte : a= "texte"
Affichage : print(a)
```

Calculs de base et affectation : a = 2 ou b = 3 ou c = a + b

Attention

Le = ne copie pas les listes. Pour copier une liste b = a[:]

Les tests : if a  $\leq 10$  :

Les boucles : for i in range(10) :

Les fondamentaux de la programmation en Python

La force de Python repose sur ses nombreuses bibliothèques.

```
Import d'une bibliothèque : import numpy ou import networkx as nx
```

Appel d'une fonction : numpy.array(a)

Transformation d'un objet en liste : list(a)

Pour la bibliothèque NetworkX :

```
Création d'un graphe : G=nx.Graph()
```

Ajout d'arcs à un graphe : G.add \_ edges \_ from(liste)

```
Suppression d'un noeud : G.remove _ node(10)
```

Calcul d'un indicateur : deg=nx.degree(G)

```
Calcul d'un plus court chemin : nx.shortest _ path(G, 15, 45)
```

Longueur d'un plus court chemin :  $nx.shortest \_ path \_ length(G, 15, 45)$ 

Les fondamentaux de la régression linéaire

$$y_{i} = \widehat{y}_{i} + e_{i} \text{ et } \widehat{y}_{i} = ax_{i} + b \text{ avec } a = \frac{Cov(x, y)}{Var(x)} \text{ et } b = \overline{y} - a\overline{x}$$

$$y_{i} - \overline{y} = \widehat{y}_{i} - \overline{y} + e_{i}$$

$$\sum_{i}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2} = \sum_{i}^{n} (\widehat{y}_{i} - \overline{y})^{2} + \sum_{i}^{n} e_{i}^{2}$$

$$SCT = SCE + SCR$$

$$R^{2} = \frac{SCE}{SCT} = 1 - \frac{SCR}{SCT}$$

Les fondamentaux de la régression linéaire

Erreur type (écart-type) de la régression : 
$$\sigma = \sqrt{\frac{SCR}{n-2}}$$

Variance de prédiction : 
$$S_i = \sigma \times \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}}$$

Intervalle de confiance (de prédiction) des observations :  $\widehat{y_i} \pm t_{lpha}^{n-2} imes S_i$ 

La fonction de scipy lineregress renvoie " Standard error of the estimated gradient " :  $\frac{\sigma}{\sqrt{\sum{(x_i - \bar{x})}^2}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n \times Var(x)}}$ 

# Système multi-agents

```
NetLogo
```

NetLogo repose sur des fonctions qui donnent des instructions à des agents :

```
to setup ask patches [ set pcolor green ] end
```

Les patches sont des agents stationnaires qui peuvent changer d'état :

```
ask patches with [random 100 < 30][ set pcolor brown ]
```

Les turtles sont des agents plus classiques, ils peuvent changer d'état, se déplacer, donner naissance, mourir...

```
create-turtles 1 [setxy 0 0 set color green]
ask turtles [right 2 forward 1]
ask turtles [ask neighbors with [pcolor = green] [sprout 1 [set color red]]]
ask turtles [die]
```

# Système multi-agents

#### NetLogo

Il est possible de demander à NetLogo d'itérer à l'infini les fonctions développées, pour arrêter ces itérations il existe alors une commande assez courante :

```
if not any? Turtles [stop]
```

NetLogo peut produire des graphiques statistiques. Pour cela, il faut lui indiquer quand enregistrer les données et quand les effacer :

```
tick
reset-ticks
```

Il est possible de créer des variables :

# Système multi-agents

#### Application

On va simuler la propagation d'un feu produit par l'incendie d'une usine située en plein milieu d'une forêt.

On va considérer deux types d'agents. Les agents de type "feu" ("turtles") et les agents de type "sol" ("patches").

Les agents de type "sol" peuvent prendre trois états : un état végétation absente (couleur noire), un état végétation en bonne santé (couleur verte), un état végétation brulée (couleur marron).

Les agents de type "feu" donnent naissance à des agents de type "feu" (le feu se propage) dans les cellules voisines si celles-ci sont des agents de type "sol" à l'état "végétation en bonne santé". Les agents de type "feu" transforment le sol en "végétation brulée" et meurent.

Nous allons chercher à partir de quelle densité de végétation, un départ de feu localisé est amené à bruler toute la végétation d'un territoire.

39 / 39