

L'urbanisation et les facteurs de risques d'inondation

1. Introduction

Ce chapitre traite de l'impact de l'urbanisation d'un bassin versant, ou d'une portion de bassin sur les flux des cours d'eau. Calculer le facteur de risque de crues et de crues pluviales est pertinent pour les bassins fortement urbanisés. Nous pouvons prendre comme exemple les bassins parisien et londonien. Leur morphologie géographique – les deux capitales sont situées au fond de cuvettes – et leur grand étalement urbain les rend sensibles aux inondations (d'origine pluviale ou non). Cependant, le drainage de ces deux bassins limite le risque... tant que la crue ne dépasse pas les capacités d'évacuation.

Par crue pluviale, on signifie le fait que le flux d'un cours d'eau augmente d'une façon spectaculaire, sur un laps de temps de quelques heures, suite à une pluie intense tombée sur le bassin versant de ce cours d'eau. Une crue pluviale peut arriver pendant une période où le débit habituel est plutôt faible, du fait par exemple de l'évapo-transpiration (exemple : la Seine pendant le mois d'août à Paris). Elle peut se passer également pendant une période de fortes eaux (la Seine en janvier à Paris). On différencie d'une part, une crue pluviale après une forte pluie sur le bassin versant, et la crue qui correspond à l'atteinte d'un niveau d'eau exceptionnel, par rapport aux hautes eaux habituelles calculée sur plusieurs années. Une « crue pluviale » a donc un aspect plus ponctuel qu'une « crue ». Selon Lazzaro (cf : schéma 2.4), la phase montante d'une crue pluviale ne dépasse pas une durée 15 heures. La crue de la Seine à Paris, en 1910, a nécessité 10 jours environ pour atteindre son pic (8,62 m à Paris le 28 janvier).

Au départ, le souhait était de trouver un outil qui puisse être utilisé sur n'importe quel territoire, d'une façon uniforme. Mais, c'était oublier le fait que chaque espace est unique. Chaque bassin versant, chaque ville, chaque quartier a sa propre unicité, non reproductible.

On choisit de concevoir un outil de calcul des risques fluviaux suite à une urbanisation, en se basant sur le bassin versant de la Seine à Paris, et celui de la Tamise, à Londres; on met « un zoom » sur la boucle de la Seine, située entre Chatou et Montesson (Yvelines), un autre sur la courbe comprise entre Greenwich Reach et Erith Reach, à l'est de la capitale britannique. Le Pr Jean-Noël Salomon¹ recommande, pour analyser un risque d'inondation, d'étudier d'abord la morphologie de l'ensemble du bassin versant. Ensuite, peuvent venir les calculs de modélisation ou de probabilité, sur une

¹ *L'Homme face aux crues et aux inondations*, Jean-Noël salomon, Ed Presses Universitaires de Bordeaux, 1997

partie de ce bassin versant. Stéphanie Beucher¹, souligne également la nécessité de procéder d'abord par le territoire car celui-ci inclut l'ensemble des acteurs et des enjeux concernés par le fleuve. De même, N. Meschinet de Richemond et M. Reghezza dénoncent le fait que malgré les discours officiels, les études hydrologiques restent souvent séparées de la réalité territoriale. Ces chercheurs conseillent donc de procéder d'abord par une analyse géographique et historique globale - en fait la compréhension du terrain – et uniquement après les calculs mathématiques.

Si la littérature est assez abondante sur les risques d'inondations en Ile-de-France, on a soit des analyses purement topographiques, soit des méthodes statistiques, comme l'a montré le colloque organisé par la société française d'hydrologie, à Paris, en juin 2010. À l'image de Jean-François Gleyze et de M. Reghezza, l'étude ne portera pas uniquement sur les aléas - ces derniers sont extrêmement complexes - mais surtout sur la vulnérabilité matérielle et humaine. Pour l'aspect matériel, nous mettrons ensemble les enjeux géographiques/urbanistiques et économiques, en utilisant notamment le concept de produit intérieur brut (PIB) régional. Cette utilisation commune de la vision du bâti et celle de l'économie est plus rarement citée dans la littérature ; cependant, les « Grands lacs de Seine » ont réalisé une étude (publiée en 1998) sur les coûts que causeraient aujourd'hui une crue de type 1910.

Ce chapitre se veut comme l'ouverture d'une piste de réflexion, et non comme une analyse exhaustive et comparative des risques d'inondations dans les deux capitales. En effet, on a été confronté, au début des recherches, à de nombreuses inconnues. Parmi les plus évidentes, nous pouvons citer le problème d'étalonnage pour l'altitude zéro, dès lors que l'on effectuait une comparaison entre les deux capitales. En effet, le « zéro » d'altitude n'est pas le même pour les cartes marines et pour les cartes terrestres. Surtout, l'étalonnage est également différent non seulement entre les régions françaises (par exemple Marseille et Brest), mais également entre les cartes françaises et Britanniques. C'est un géomètre de l'Institut de Géographie National (IGN), M. Alain Coulomb, qui m'apporta une réponse face aux différents échelonnages du « zéro ». Ce géomètre ayant effectué des nivellements comparatifs dans le tunnel de la Manche, au moment de sa construction, a pu déterminer avec précision la différence d'étalonnage de l'altitude entre le système de l'IGN 69 (France) et celui de l'Ordnance Survey (Royaume-Uni) : 0,42 m de plus pour les mesures françaises². Dès lors, on pouvait établir un premier lien comparatif entre les cartes françaises et britanniques.

¹ *Le risque d'inondations dans le Val-de-Marne*, Annales de géographie, N° 657, 2007, p470-492, Ed Armand Colin

² Tableau issu de la page 12 du *compte-rendu CR/G 68, Liaison des réseaux de nivellement anglais et français par le tunnel sous la Manche/Rapport de mission* (1994), Alain Coulomb, IGN, Mai 1996

Le calcul de l'altitude du repère OS, G 5249 à partir du repère IGN B'N 135 h

D90	Dénivelée totale IGN 1		Dénivelée totale IGN 2		Dénivelée OS	
	Altitude normale		Altitude normale		Altitude normale	
	IGN 69 (m)	"IGN 83" (1) (m)	IGN 69 (m)	"IGN 83" (1) (m)	IGN 69 (m)	"IGN 83" (1) (m)
Altitude du repère B'N 135 h	15,3798	15,1506	15,3798	15,1506	15,3798	15,1506
Dénivelée totale	44,8466	44,8466	44,8523	44,8523	44,809	44,809
Altitude du repère G 5249 (2)	60,2264	59,9972	60,2321	60,0029	60,1888	59,9596
Altitude du repère G 5249 fournie par l'OS (3)	(59,809)	(59,809)	(59,809)	(59,809)	(59,809)	(59,809)
Ecart (2) - (3)	0,4174	0,1882	0,4231	0,1939	0,3798	0,1506

(1) "IGN 83" - le repère B'N 135 h a été rattaché à la "traverse Nord-Sud" (cf. "Un nivellement de très haute précision : La traversée Marseille-Dunkerque 1983" par Michel KASSER).

Les deux capitales du point de vue de leur urbanisme présentent de nombreux points similaires, qui poussent à la comparaison : forte centralisation nationale, pôles principaux non seulement politique mais également économique et démographique, et extension urbaine difficilement contrôlable. Géographiquement, les deux villes sont traversées par un fleuve. Géologiquement, Paris et Londres sont situées dans un même grand bassin sédimentaire franco-anglais, avec une sorte de gouttière¹ au milieu : la Manche. Vers 2,6 ou 1,8 millions d'années BP, « au début de pléistocène, le littoral de la mer du Nord se situe très au nord du Pas-de-Calais actuel, le long d'un axe joignant l'East Anglia à Anvers² ». Du fait des périodes glaciaires et la présence calottes de glaces sur les îles britanniques, la Manche est un fleuve qui se jette dans le golfe de Gascogne. A cette époque géologique, la Seine et la Tamise font partie du même système fluvial.

A l'inverse, du point de vue hydrologique, les deux villes sont confrontées à des situations différentes : Paris est menacée par des crues d'origine pluviale uniquement, Londres par des inondations d'origine ombrique également, mais surtout maritime. Cette différence de positionnement par rapport à l'estuaire fait que la capitale britannique est particulièrement sensible à l'élévation du niveau de la mer, et aux vents des dépressions atmosphériques situées au-dessus de l'Atlantique et au nord-ouest des îles britanniques. Ces vents s'engouffrent dans le corridor de la Manche – ce qui provoque un effet Venturi - puis suivent le couloir estuarien de la Tamise. Quand une marée haute, à fort coefficient, se combine à ce type de vent, ainsi qu'éventuellement à une crue fluviale venant de l'amont, le niveau de la Tamise augmente fortement, risquant de provoquer de fortes inondations. A titre d'exemple, à marée haute moyenne, le niveau du fleuve entre Greenwich Reach et Erith Reach se situe à 5 m au-dessus du rivage : le sol, dans cette zone de marais, est à l'altitude « zéro » (plus ou moins 1 m).

¹ *Le relief de la France*, J. Beaujeu-Garnier, Ed. SEDES, Paris, 1972, p 126

² *Le relief de la France; coupes et croquis*, yvonne Battiau-Queney, ed Masson géographie, Paris 1993, p 132

Après un aperçu des principales caractéristiques géologiques du bassin franco-londonien, on analysera les composantes de l'événement « crues » puis la vulnérabilité matérielle et humaine des bassins parisien et londonien. Par vulnérabilité matérielle dans les régions parisienne et londonienne, on désigne l'ensemble des structures - et des bénéfices que ces dernières apportent - susceptible d'être endommagé par une inondation, du fait de son exposition à l'aléa des crues. Par vulnérabilité humaine, on signifie l'ensemble des populations habitants dans ces deux zones (péri)urbaines exposées à un risque de dommages corporels et/ou psychologiques plus ou moins graves.

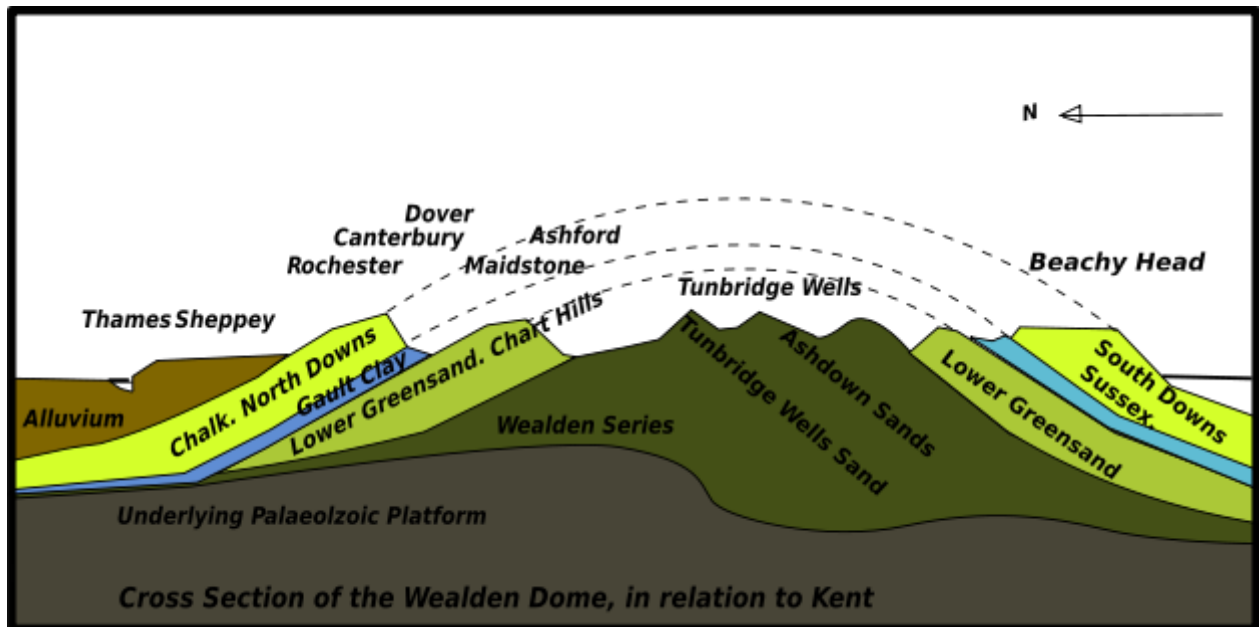
2. La morphologie des bassins versants

2.1 La morphologie des Bassins parisien et londonien

Les deux bassins se caractérisent par « une remarquable continuité des lignes de cuestas, concrétisant une cuvette presque parfaite entourée par une couronne quasi-continue de massifs anciens sur lesquels s'appuient les séries sédimentaires¹ ». Ces massifs sont nés suite à des plissements hercyniens primaires pour le Bassin de Paris. Ils sont issus de plissements calédono-hercyniens primaires pour le Bassin de Londres. Les reliefs calédoniens sont situés en Ecosse (d'où leur nom). Par extension, les massifs nés à la même époque que l'orogénèse calédonienne peuvent être qualifiés également de calédoniens : la chaîne Pennine au nord du Bassin Londonien, et les Monts Cambriens à l'ouest-nord-ouest. Toujours dans la même direction (O-N-O), mais plus près du centre du bassin, on trouve les cuestas des Costwold Hills. Au nord-ouest du grand Londres, se dressent les collines Chiltern (craie et nodules de silex), dont le côté nord-ouest, face à la vallée d'Aylsebury, est escarpé. A l'ouest et au sud-ouest du Bassin Londonien, on trouve des reliefs hercyniens, de part et d'autre du Canal de Bristol : les Black Mountains et la Cornouaille. Enfin, au sud, les Downs (du germanique « dun », colline) du nord et du sud, avec entre les deux, le Weald : ces reliefs proviennent de l'érosion d'un seul et même anticlinal, datant du Crétacé inférieur, et qui trouve son prolongement, en direction du sud-est, dans les collines du Boulonnais, en France.

¹ *Géomorphologie*, Roger Coque, Ed Armand Colin, Paris, 2002, p 98

Coupe transversale du dôme du Weald, dans le comté du Kent



D91. Sources : ClemRutter, 22 avril 2007.

Alluvium : alluvions

Chalky North Downs : les Downs du nord, crayeuses. Les Downs du Kent sont herbeuses.

South Downs : les Downs du sud

Wells : puits

Underlying Palaeozoic platform : plateforme paléozoïque (530 à 245 millions d'années BP).

Sand : sable

Greensand : grès de couleur vert-olive. C'est un sédiment d'origine marine et souvent associé à des couches de craie et d'argile.

Au nord, sur la carte, l'érosion des reliefs a déposé des alluvions dans le lit de la Tamise. Au sud, on voit le littoral. Les roches présentes dans le substrat du Weald sont le grès (sur les crêtes), et l'argile (dans les vallées). En superposition de ce substrat, on trouve des couches de sable et de craie. Ainsi, comme dans le Bassin Parisien, on retrouve l'alternance de roches perméables et imperméables, provenant de plateformes anciennes ou de sédiments plus récents. La présence de couches géologiques perméables, dans les bassins versants de Londres et Paris, participe à rendre souterrain une partie du ruissellement, et donc à ralentir l'avancée des eaux.

La plateforme du Weald correspond à l'orogénèse calédonienne (Silurien, - 420 à - 400 MA) responsable de la surrection de la chaîne écossaise et des Ardennes franco-belges. Cette plate-forme est donc plus ancienne que celle du Bassin Parisien qui s'est formée sous l'orogénèse hercynienne. Cette dernière constitua « les quatre cinquièmes du tréfonds structural de la France »¹. Elle a

¹ *Géographie physique de la France*, Gérard Mottet, ed PUF, Paris, 1993, 3^e ed, p 22 & 23

grandement participé à l'élaboration des massifs armoricain, vosgien et central, nés à l'ère précambrienne. Ainsi, les deux bassins (Paris et Londres) à la fois forment un même ensemble structural (sédiments, anticlinal Wealdieno-Artois, continuation des plissements) et montrent des différences structurales.

Les massifs, qui entourent le Bassin Parisien, datent pour les plus vieux de 2 milliards d'années : le Massif Armoricaire (Vendée, Bretagne et Cotentin), les Vosges et le Massif Central. Ce dernier mesura probablement jusqu'à 20.000 mètres d'altitude, « à l'emplacement actuel du Limousin¹ », il y a 300 MA, avant ses différentes phases d'érosion et de rajeunissement. Il joua un rôle important dans le dépôt d'alluvions – et notamment de sable - dans le Bassin Parisien, et particulièrement dans le bassin versant de la Seine en Ile-de-France, via la paléo-Loire. En effet, la Loire, vers Briare, avant de bifurquer aujourd'hui vers le nord-ouest, continuait vers le nord et se jetait dans le Loing, lui-même affluent de la Seine.

Au cours de l'ère primaire, les Ardennes, au nord-est du Bassin Parisien, sont nées pendant la période du Silurien » (- 420 à - 400 millions d'années ou MA). Le Bassin Parisien, composé du socle précambrien (20 à 30 km d'épaisseur au niveau national), est recouvert de différents sédiments (2 à 3 km d'épaisseur) qui se sont déposés au fur et à mesure des différentes transgressions des mers péri-continentales (ère secondaire) et de l'érosion des massifs anciens. Les différentes transgressions du secondaire ont eu lieu au :

Période (P.) du Jurassique (- 204 à - 130 MA)

Epoque (E.) Lias ou Jurassique inférieur (- 205 à - 180 MA). Les Bassins Parisien et Londonien, ainsi que la Manche, sont des territoires sous-marins. Les dépôts sont composés de marne, d'argile, et de marne-calcaire, « souvent imperméables et peu résistants ».

E. Dogger et Malm ou Jurassique moyen et supérieur. La transgression et la sédimentation continuent, et atteignent même les Ardennes et l'Artois. Les massifs hercyniens sont protégés par une épaisse végétation, ce qui limite « les apports terrigènes et détritiques »². L'eau, peu polluée et assez chaude à cette époque, est un bon biotope pour les coraux. On retrouve les traces de ces derniers, sous forme d'un calcaire très dur, dans le massif du Saussois et « sur les récifs de la vallée de l'Yonne où l'on peut reconstituer un véritable récif-barrière ceinturant un lagon, de Mailly-la-Ville à Coulanges-sur-Yonne».

Cette période du Jurassique a donc fourni une importante sédimentation en calcaire (5 à 600 m

¹ *Le relief de la France*, J. Beaujeu-Garnier, Ed. SEDES, Paris, 1972, p 3

² *Guide géologique Bourgogne-Morvan* par Pierre Rat et al, p 122 à 129, Masson, 1972

d'épaisseur à l'échelle française), dans les bassins parisien (côtes de Lorraine, Bayeux) et londonien (Oxford).

E. Crétacé moyen, entre -100 et – 95 MA. Nouvelle et importante transgression marine sur le bassin franco-londonien : c'est la mer de craie. La sédimentation continue jusqu'au Crétacé supérieur (- 95 à - 65 MA).

L'ère secondaire a apporté une forte et longue sédimentation marine, notamment sur le Bassin parisien : « l'empilement des terrains secondaires atteint 2500 m », ce qui n'est pas énorme pour des mesures géologiques. Mais la largeur de ces couches est de 800 km, ce qui représente un large territoire géologique.

L'ère tertiaire, plus agitée tectoniquement parlant que la précédente, voit la régression marine du Bassin Parisien. Deux périodes constituent cette ère : le Paléogène et le Néogène. Plusieurs sous-systèmes se distinguent au cours de la formation du Bassin :

P. Paléogène (-65 à – 23/24,6 MA)

E. Paléocène (- 65 à – 53 MA). Le plateau ibérique finit sa rotation, pousse le socle « français », crée les Pyrénées, craquelle et pousse les sédiments secondaires vers le nord. Le Bassin de Paris se sépare du « domaine océanique alpin¹ ». Il devient un golfe de la Mer du Nord puis un territoire lacustre sous l'effet du bombement de l'Artois, « d'où l'alternance, sur de faibles épaisseurs de sédimentation, de calcaires marins ou lacustres, d'apport terrigènes (marnes, sables, argiles)² ».

E. Eocène (-53 à – 34 MA). Les Pyrénées se soulèvent fortement. Le Bassin Parisien reçoit des sédiments d'origine marines : sable (via les deltas), calcaire, marne, gypse. Il en reçoit également d'origine lacustre : le calcaire à planorbes³.

E. Oligocène (- 38 à – 23 MA). Les Alpes naissent et créent des répercussions sur la géologie du territoire national. « La France de l'ouest et du centre-nord⁴ » - dans lequel se situe le Bassin parisien – est peu sensible à cette surrection. Celle de l'est et du sud-est est changée en profondeur, et concerne les périphéries du Bassin de Paris, et notamment le fossé de la Loire, à Forez.

¹ Avant la surrection alpine, le territoire, occupé aujourd'hui par les Alpes, était maritime.

² *Géographie physique de la France*, Gérard Mottet, ed PUF, Paris, 1993, 3^e ed, p 31

³ Planorbe : mollusque gastropode, dont la coquille est enroulée dans un plan et qui vit dans les eaux douces calmes (diamètre 3 cm environ). *Le Petit Larousse Illustré* 1992, Ed 1991, Paris.

⁴ *Géographie physique de la France*, Gérard Mottet, ed PUF, Paris, 1993, 3^e ed, p 33 et 36

P. Néogène (-23/24,6 à -1,6 ou 2,4 MA)

E. Miocène (-23 à - 5,1 MA). La séparation en deux parties géologiques de la France continue. Le bassin Parisien reçoit des alluvions lacustres, et encore, en moindre part, de l'Océan Atlantique. La Beauce est un grand lac, où se déposent des calcaires. Une fois la Beauce émergée, « des sables fluviatiles cristallins provenant du Massif central¹ » recouvre les calcaires beaucerons et la Sologne. La Mer des faluns monte ensuite jusqu'à Blois. Après sa régression, suit une période de reprises des alluvions provenant du Massif Central via la paléo-Loire. Le Bassin parisien subit l'érosion. Le calcaire de Beauce est altéré et silicifié : cela donnera la pierre meulière, que l'on retrouve aujourd'hui dans nombre de constructions traditionnelles. Tous ces phénomènes transforment le Bassin Parisien en pénéplaine. A la fin du Miocène, le niveau marin baisse de 200 à 300 m, ce qui renforce l'érosion des continents.

E. Pliocène (- 5,3 à -1,65 MA). Le Bassin parisien est émergé. Seuls subsistent quelques zones immergées en basse Loire, à Rennes, dans le sud de la presqu'île du Cotentin, et en Flandres.

L'ère quaternaire, qui va de -2,6 millions d'années à aujourd'hui, est caractérisée par un refroidissement. Le Bassin Parisien cesse d'être une zone à climat chaud et humide. Avec des interglaciations entre chacune d'entre elles, quatre périodes de glaciation apparaissent (les noms sont tirés d'affluents du Danube) :

la glaciation Günz (- 1,2 à 0,7 MA). C'est la plus longue période glaciaire.

Mindel (- 700.000 à - 600.000 ans)

Riss (- 300.000 à - 120.000 ans)

Würm (80.000 à 7.800 ans av J.C).

L'on ne retrouve pas de trace d'Homo Habilis dans le Bassin Parisien. Les plus anciens restes humains dans cette région viennent de l'Homo Erectus (ou Pithécanthrope), branche née il y a 1,8 MA et qui céda progressivement la place à l'Homo Sapiens vers 100.000 BP. L'Homo Habilis, à partir de l'Afrique de l'est, colonisa l'Europe, et le territoire français (Solutré, la Chapelle-aux-Saints). Y-a-t-il eu des Homos Habilis dans le Bassin parisien ? Il semblerait qu'ils se soient plutôt installés dans la moitié sud de la France (Bourgogne, Dordogne), probablement, justement, à cause du climat plus clément. La calotte glaciaire de l'Europe du nord allait jusqu'en Belgique et jusqu'au nord de Londres. Celle des Alpes allait jusqu'à Lyon. La fin de la dernière glaciation (Würm) correspond, sur le territoire français, au mésolithique (6.000 à 3.000 av J.C) puis au néolithique

¹ *Géographie physique de la France*, Gérard Mottet, ed PUF, Paris, 1993, 3^e ed, p 33 et 36

(3.000 à 200 ans av JC). Dans d'autres régions du monde, comme la Mésopotamie (actuelle Irak), les époques mésolithique et le néolithique sont apparus plus tôt : -12.000 pour la première et -8.000 ans pour la seconde, du fait de leur position plus méridionale¹.

Pendant les périodes de glaciation, l'eustatisme est négatif : le niveau des mers descend entre 100 et 150 m. La Manche est émergée, ce qui permet – ou permettrait - le passage d'hommes préhistoriques de l'autre côté du bassin franco-londonien. Cet eustatisme négatif a un impact sur le lit des rivières. « La Seine [devient] un affluent de la rive gauche d'un fleuve principal drainant l'axe de celle-ci. [...] Les cours d'eau doivent creuser pour rejoindre [un] niveau de base plus bas [...]».

Pendant les périodes d'interglaciation, l'eustatisme est positif. Les rivières qui se trouvent près des côtes marines voient le niveau de la mer remonter plus vite que celui de leurs alluvions. A l'époque post gallo-romaine, on retrouve des vestiges de ces changements de ligne côtière, notamment sur la partie maritime du Bassin Parisien (côte Atlantique et Manche) : falaises « mortes » et remblaiement alluvial du Marquenterre (Baie de Somme) et cordons dunaires successifs de la Flandre maritime.

Ces différentes phases de l'évolution géologique du Bassin Parisien font que ses couches sédimentaires sont ainsi composées de roches perméables (calcaire, craie, sable) et de roches imperméables (comme l'argile et la marne). Une couche de sédiment crayeuse peut se décomposer et donner de l'argile à silex, comme c'est le cas dans la région de Rouen : la couche perméable devient alors imperméable. La structure géologique du bassin versant de la Seine en Ile-de-France est donc composée d'un lit moyennement favorable aux inondations. Il ne s'agit pas d'un terrain granitique imperméable (comme l'on peut trouver en montagne), ou bien d'une surface uniquement recouverte de meulière (roche également imperméable, présente en Champagne), de marne ou d'argile. Il ne s'agit pas non plus de territoires recouverts que de sable ou calcaire (ce dernier se désagrège avec le dioxyde de carbone), qui favorisent la pénétration de l'eau dans le sol et ainsi ralentissent l'écoulement, les eaux souterraines étant plus lentes que les superficielles.

Cette histoire géologique du bassin de Paris, est donc basée essentiellement sur trois acteurs : la tectonique des plaques, le climat, et le temps...long! Mais depuis la fin du Pliocène, vers 1,8 M.A B.P – ce qui correspond au début du Paléolithique inférieur – « l'homme est devenu un acteur de l'évolution de la Terre² » (G. Mottet). Selon Jean Demangeot, les milieux restent naturels jusqu'au Mésolithique, et les paysages sont simplement retouchés jusqu'au XVIIe siècle, voire le XVIIIe

¹ En Europe du sud, le néolithique a commencé vers – 7000 ans av JC, et la civilisation crétoise démarra vers 2.700 avant notre ère.

² *Géographie physique de la France*, Gérard Mottet, ed PUF, Paris, 1993, 3^e ed, p 40

siècle, dans les campagnes européennes¹. Du point de vue hydrologique, dès l'Antiquité, les hommes ont aménagé des réseaux d'eau (aqueduc d'Arcueil). En Hollande, les premiers polders datent du XIII^e siècle, et le bassin versant se trouve en aval de plusieurs fleuves du Bassin Parisien : l'Oise (via le canal du nord), la Meuse, et la Moselle (via le Rhin). Le canal de l'Ourcq, quant à lui, fut construit en 1560, après « les premiers essais d'écluse à sas de France² », sur la rivière du même nom, probablement par Léonard de Vinci.

Du point de vue morphologique, le profil longitudinal de la Seine (longueur : 776 km) est assez plat. La source de cette dernière est située sur le plateau de Langres (qui « culmine » à 512 m, au Mont Saule), à Source-Seine, à 446 m d'altitude. Cela fait une moyenne de 0,57m de dénivelé par km fluvial. En comparaison, le Rhône a un dénivelé moyen de 2,77m/km.

A la confluence de la Seine et de l'Yonne, la dernière a un débit annuel moyen de 93 m³/s et un bassin versant de 10 800 km², [contre] « à peine 80 m³/s et 10 300 km² pour la Seine³ ». Même si l'on prend en compte la source de l'Yonne (Mont Prénéley, 730 m, Morvan), que l'on compte cette source comme point de départ du fleuve principal du bassin versant de « la Seine-Yonne », le dénivelé moyen reste assez faible : 0,94m/km.

Si l'on prend en compte le fait que dès son 52^e km à partir de sa source, « la Seine n'est plus qu'à 215m d'altitude⁴ », on obtient le dénivelé moyen suivant : $215 / (776 - 51) = 215 / 725 \approx 0,30\text{m/km}$. La grande majeure partie du lit de la Seine est donc presque plat. Ce relief ne favorise pas une grande vitesse d'écoulement et donc des grands débits. Pour le profil latéral du fleuve, on reste dans des dimensions moyennes : ce n'est plus un cours d'eau de la taille d'une rivière solognote (le Beuvron par exemple) et ce n'est pas non plus l'immense largeur d'un St Laurent à Montréal (de l'ordre du km de largeur à environ 400 km de son embouchure). Si des crues doivent venir, cela sera donc via des conditions météorologiques propices. Cependant, la Seine est surtout influencée par un climat océanique : des pluies d'intensité plutôt modérée, réparties tout au long de l'année. En effet, les Anticyclones Mobile Polaires (AMP) descendent vers les latitudes moyennes, selon des vecteurs ouest vers l'est, nord-ouest vers le sud-est ou bien nord-sud, sur une zone située entre le sud et le sud-est du Groënland. Chemin faisant, ces AMP poussent les masses d'air tiède issues du *Gulf Stream* vers les côtes d'Europe de l'ouest, aidés en cela par les vents de latitude moyenne partant des côtes du nord-est des Etats-Unis et allant vers l'est. Ces vents de direction ouest-est sont probablement issus de la force de Coriolis. La différence d'avec une situation normale viendra des conditions d'évaporation (faibles en hiver, notamment en janvier), et de probabilités – faibles - de cumuls des précipitations et surtout des crues. Ces crues, pour créer les

¹ Les milieux « naturels » du globe, Jean Demangeot, ed. Armand Colin, Paris, 2000-2002 2^e éd, p 5

² Canal de l'Ourcq, http://fr.wikipedia.org/wiki/Canal_de_l%27Ourcq, 28/01/2011

³ La Seine, Wikipédia, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Seine>, 24/01/2011

⁴ La Seine, site Larousse : www.larousse.fr/encyclopedie/riviere-lac/Seine/143800, 24/01/2011.

conditions d'une inondation majeure, doivent arriver simultanément – et non successivement - sur le bassin de la Seine en Ile-de-France, notamment à l'embouchure de l'Yonne, de la Marne ou de l'Oise (pour le bassin aval de Paris intra-muros).

Ainsi, que ce soit par la géologie, la géomorphologie ou la météorologie, le risque d'inondation en Ile-de-France – type 1910 - est exceptionnel : la probabilité est centennale. Cependant, les conséquences – surtout matérielles – seraient telles que des politiques de prévoyances sont nécessaires. De plus, l'influence des zones atmosphériques polaires s'accroît en France et offre à cette dernière des conditions météorologiques de plus en plus variables. Si la théorie du réchauffement climatique se confirmait, et participait ainsi à ralentir le *Gulf Stream* via la fonte des glaciers continentaux du Groënland, les hivers d'Europe de l'ouest tendraient à se rapprocher des conditions climatiques des côtes nord-est des USA et Japon. Les différences de températures deviendraient nettement plus fortes et pourraient augmenter l'intensité des précipitations.

2.2 La morphologie des rives convexes de la Seine près de Paris

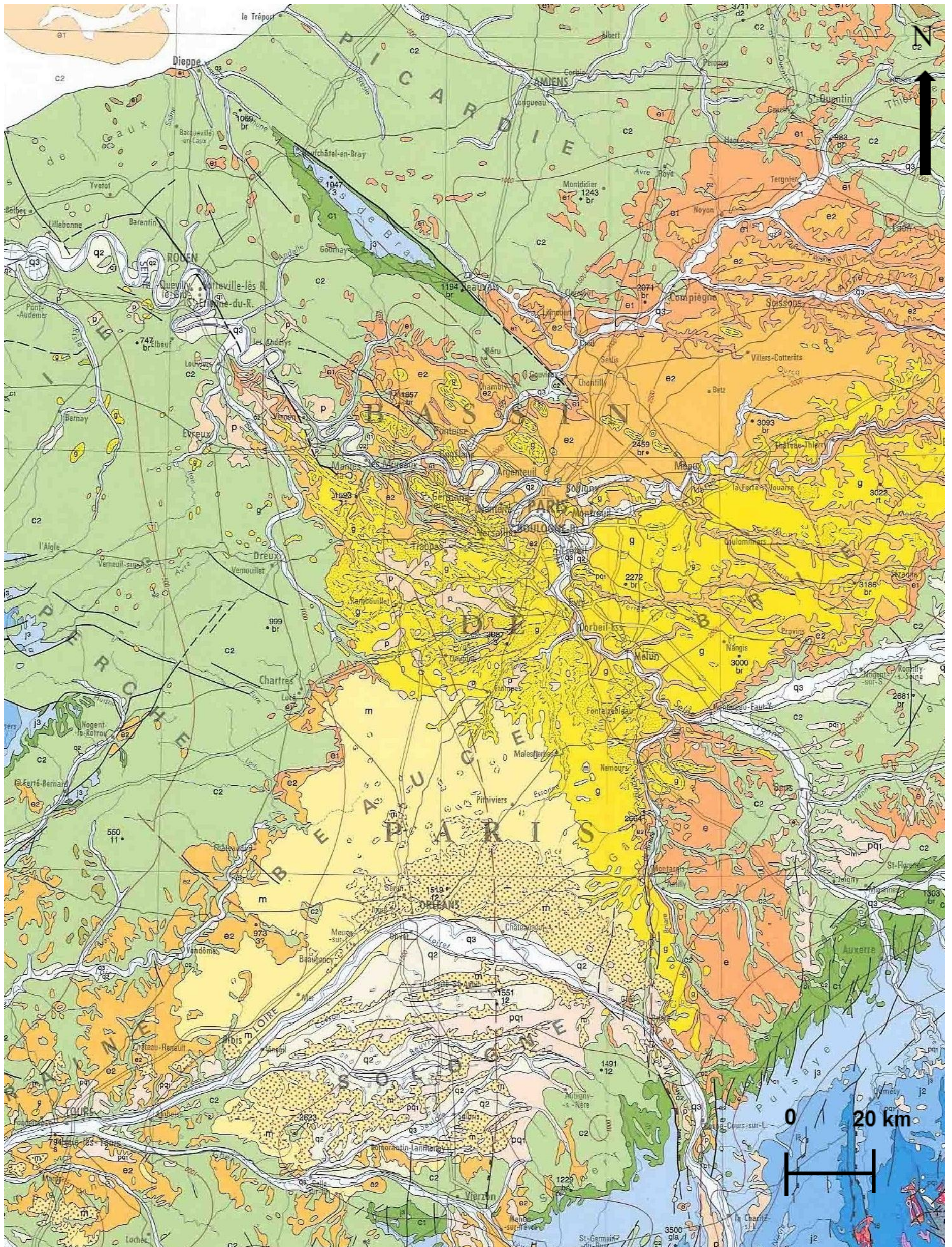
On étudie la partie de la Seine qui part globalement de Troies jusqu'à Rouen. La Seine, jusqu'à Moret-sur-Loing, se trouve dans une zone plutôt plate, typique d'une pénéplaine. Au-delà, le fleuve doit traverser la partie nord-ouest du Bassin Parisien qui s'est levée du fait d'un basculement provenant des mouvements orogéniques du Massif Central puis des Alpes : le sud-est du Bassin s'est abaissé, le nord-ouest a basculé vers le haut. Le lit de la Seine est entouré de nombreux étangs entre Troies et Moret, à la confluence avec le Loing. En aval et donc en direction du nord-ouest, le fleuve s'est enfoncé dans les sédiments calcaires, avec parfois des falaises dominant de plus de 100 m, comme en aval de Rouen (cf : coupe topographique).

Dans le cadre de l'étude de cette portion de la Seine, les rives convexes des méandres ont reçues des alluvions anciennes (pléistocène inférieur), intermédiaires (pléistocène moyen et supérieur) ou récentes (holocène). Plus on s'approche du lit mineur actuel, plus les alluvions sont récentes. Cela pose un problème pour les plaines qui, en partie ou en totalité, ne sont que légèrement plus élevées (5 m au maximum) que le niveau des plus hautes eaux connues de la Seine. En effet, certaines alluvions continuent de remplir le lit fluvial, et cela pourrait élever le niveau du fleuve, en cas de crue centennale. A Montesson (Yvelines), si le lit de la Seine était surélevé de 5 m, une crue de type 1910 inonderait presque un tiers de la plaine. De plus, l'exploitation du sable dans le lit majeur de la Seine, en amont de Paris, contribue à détériorer les rives (J.N Salomon). La dégradation de ces dernières charge l'eau de détritux minéraux qui vont remplir le lit en aval. Cela diminue l'espace entre les deux rives – si l'on fait un profil transversal – et risque de provoquer un débordement des berges et donc une inondation. De même l'exploitation du sable et du gravier dans les nappes

alluviales séquanaises « transforme en étang¹ » les carrières. Ainsi, certaines zones, classées non-inondables, pourraient dans une période de 10 à 50 ans se retrouver vulnérables.

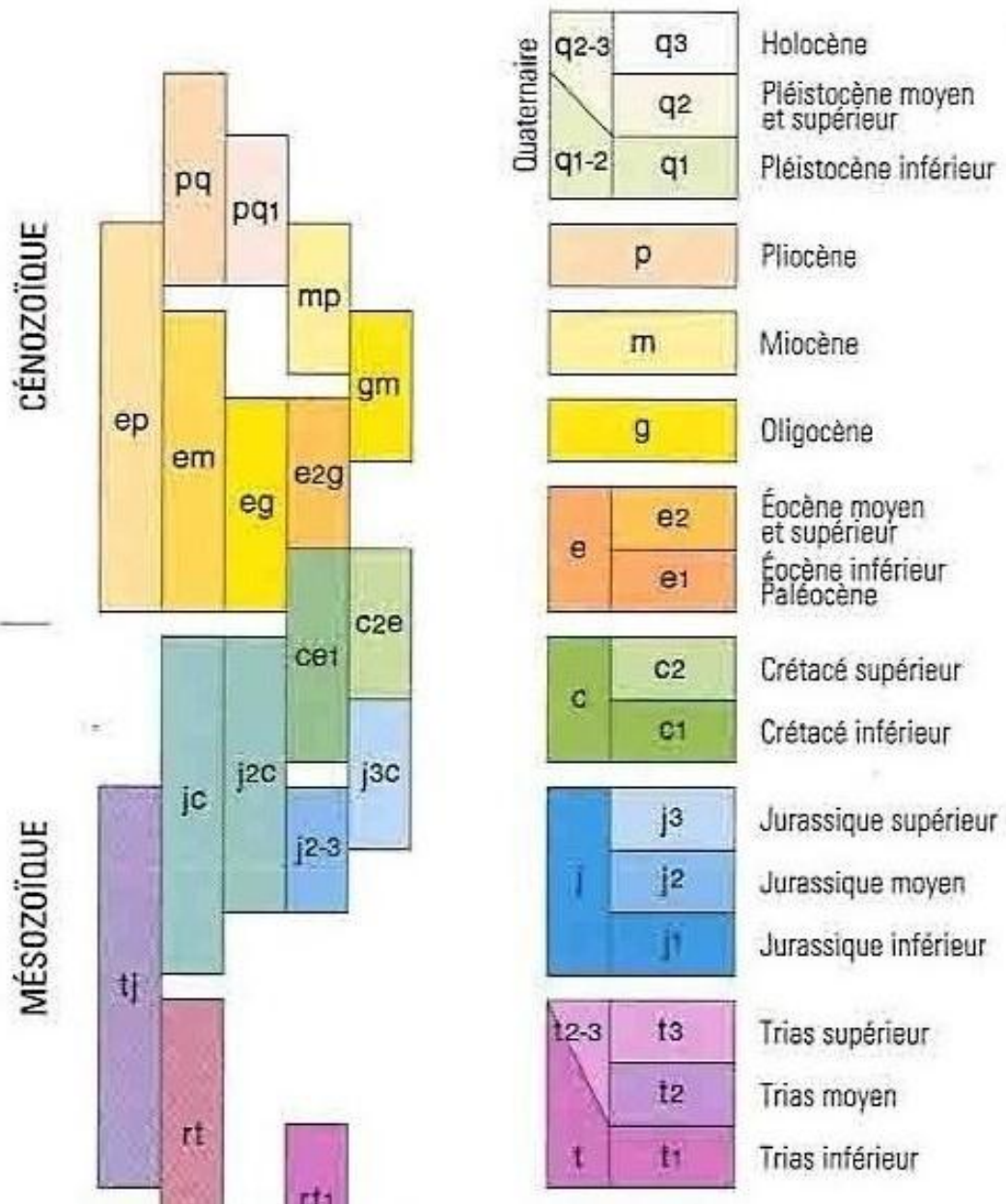
¹ *Géographie physique de la France*, Gérard Mottet, ed PUF, Paris, 1993, 3^e ed, p 75

Dressée en 1993, éditée en 1996, échelle originale : 1/1.000.000



STRATIGRAPHIE

SÉDIMENTAIRE ET VOLCANISME



INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

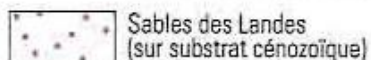
(figurées par des surcharges sur les couleurs)

SÉDIMENTAIRE

Faciès spéciaux du Quaternaire



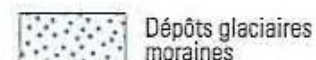
Dunes et cordons littoraux



Sables des Landes (sur substrat cénozoïque)

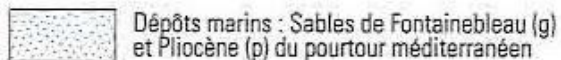


Dépôts fluvio-marins (du domaine émergé)

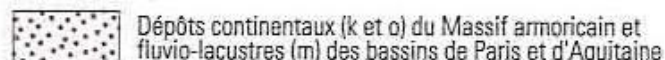


Dépôts glaciaires moraines

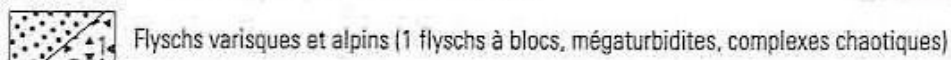
Autres Faciès à spécificité régionale



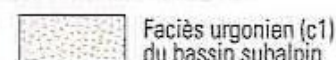
Dépôts marins : Sables de Fontainebleau (g) et Pliocène (p) du pourtour méditerranéen



Dépôts continentaux (k et o) du Massif armoricain et fluvio-lacustres (m) des bassins de Paris et d'Aquitaine



Flyschs varisques et alpins (1 flyschs à blocs, mégaturbidites, complexes chaotiques)

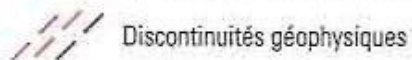


Faciès urgonien (c1) du bassin subalpin

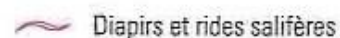
ÉLÉMENTS STRUCTURAUX

Isobathes et structures profondes

- Isobathes de la base du Pliocène : bassin du Pô
- Isobathes de la base du Cénozoïque : fossé rhénan, bassins péri-alpins, bassin sous-pyrénéen, bassin de l'Èbre et golfe du Lion
- Isobathes du toit du socle : bassin subalpin, bassins de Paris et d'Aquitaine, Manche, golfe de Gascogne



Discontinuités géophysiques



Diapirs et rides salifères

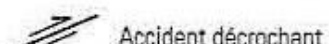
Accidents et failles



Faille normale, détachement



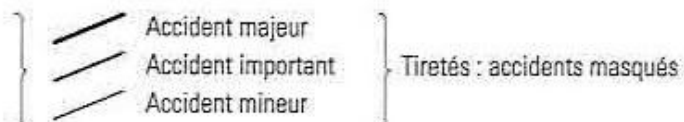
Faille inverse, chevauchement



Accident décrochant



Accident indifférencié



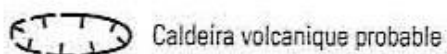
Accident majeur

Accident important

Accident mineur

Tirez : accidents masqués

Autres structures



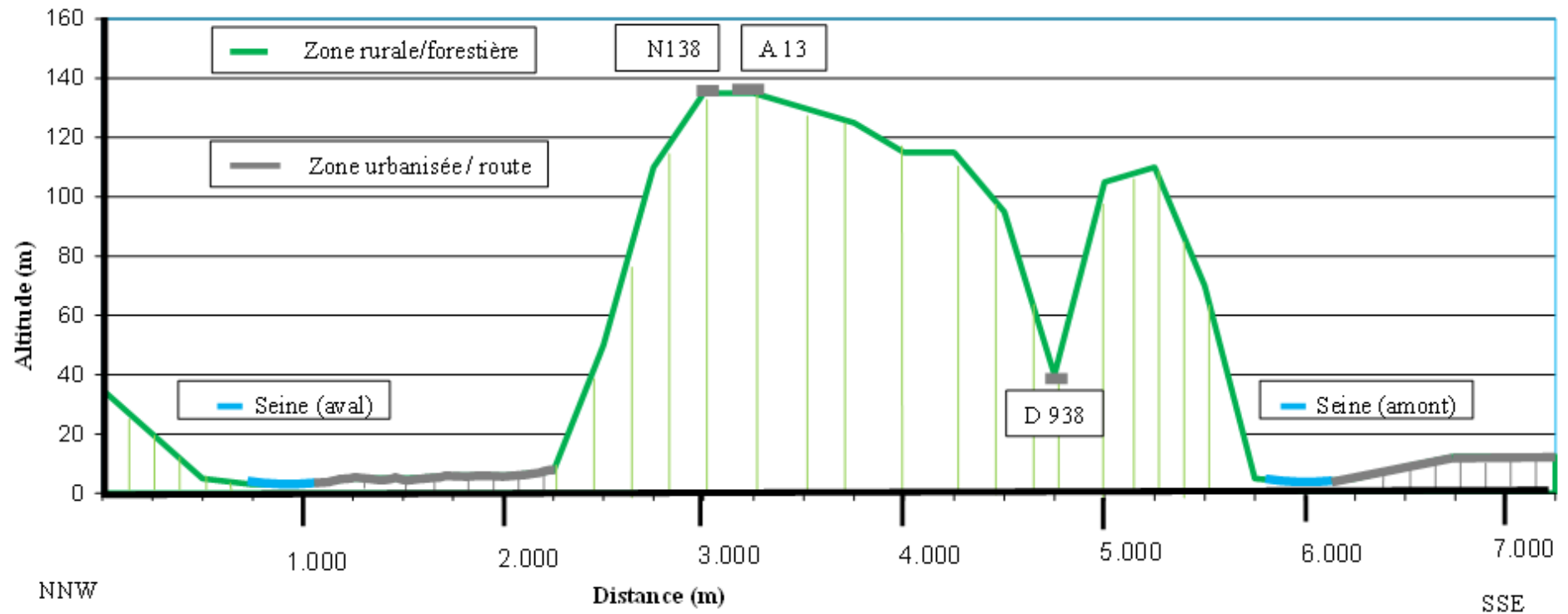
Caldeira volcanique probable



Impactite de Rochechouart

D93. Courbe topographique : Mont Miré -> Saint-Aubin-les-Elboeuf (Rouen)

BdF. 06/05/2011



Les zones urbanisées sont situées à une altitude à peine plus élevée que celle de la Seine. Les zones où les enjeux sont les plus forts sont celles qui sont le plus exposées aux risques d'inondation.

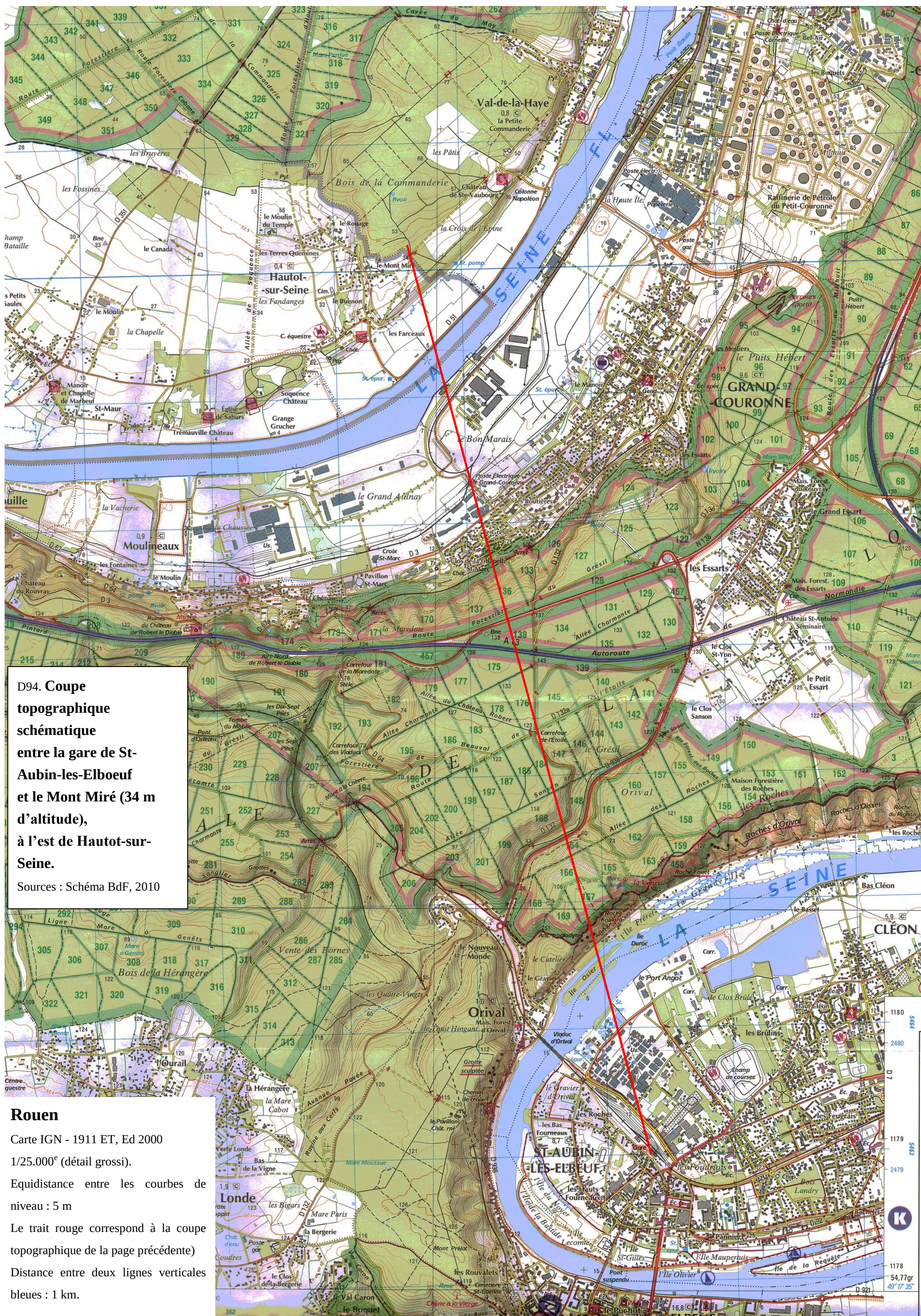
La courbe topographique fait apparaître des dénivelés plus importants que dans la réalité, du fait de la différence d'échelle entre les échelles planimétrique et altimétrique.

Echelle planimétrique

0 500 m

Echelle altimétrique

0 50 m

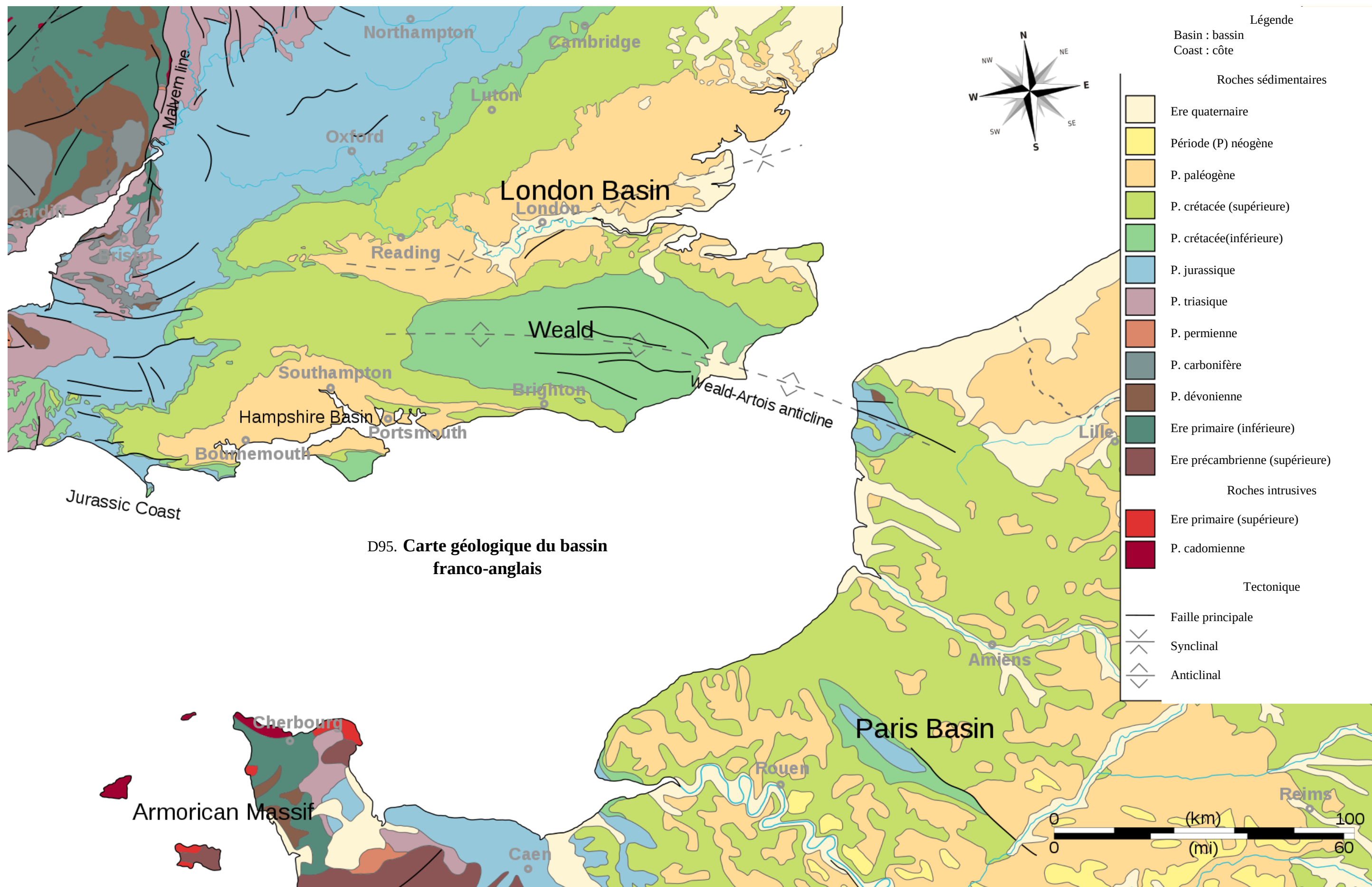


2.3 La morphologie des bassins versants de la Tamise : la Haute Vallée et le Bassin de Londres

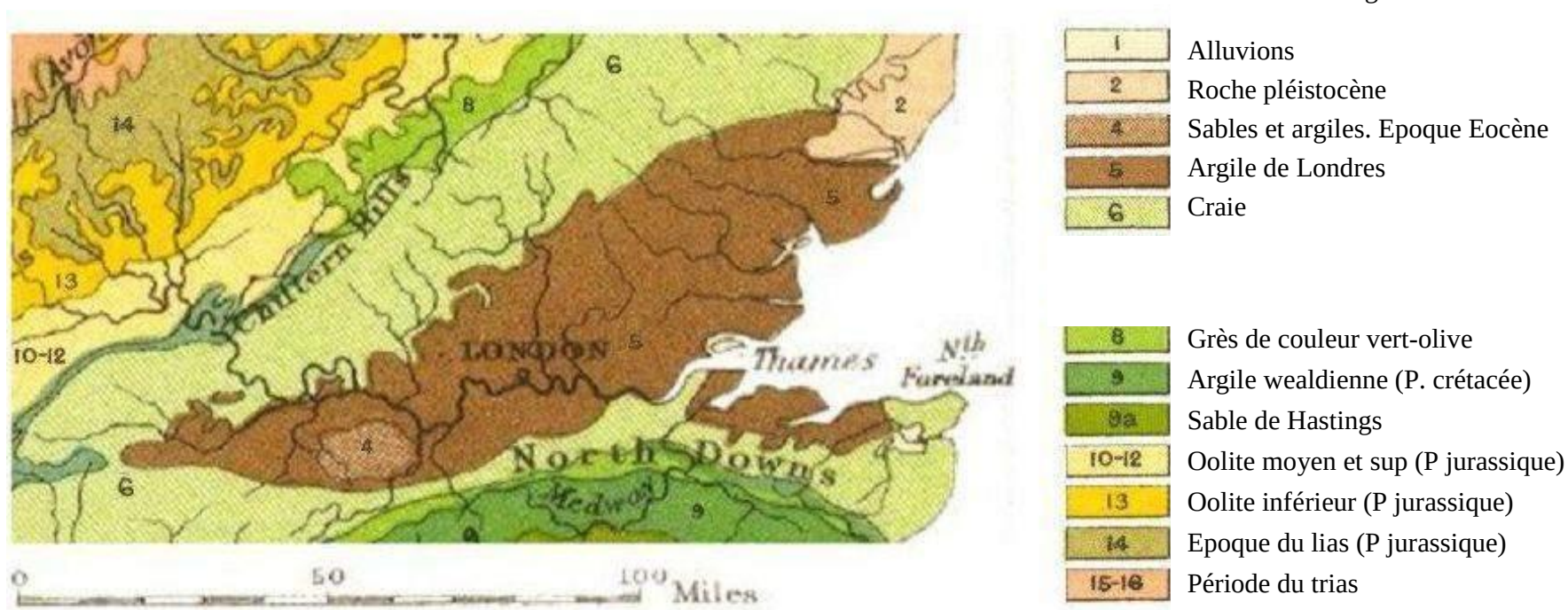
La Tamise part, à l'ouest, des collines des Cotswolds (qui culminent tout de même à 1048 m), descend sa Haute Vallée (« Upper Thames Valley »), passe entre celles du Cheval Blanc (« White Horse Vale ») et d'Aylesbury. Le fleuve traverse le passage de Goring avant d'arriver dans le bassin londonien lui-même, appelé également la Basse vallée de la Tamise (« Lower Thames Valley»). La rivière descend vers l'est, traverse Londres, la zone portuaire de Greenwich, puis après une cinquantaine de kilomètres atteint son embouchure.

Le Bassin versant de Londres est principalement drainé par la Tamise, mais le cours de cette dernière dépasse les limites de ce bassin. L'axe de ce dernier, à partir de la banlieue ouest de Londres, bifurque vers le nord-est, passant au nord du lit de la Tamise. En effet, le bassin est asymétrique : les collines situées au sud de Londres – les « North Downs » - culminent à 264 m environ, et descendent assez abruptement. Leur point culminant est situé uniquement à 20 km au sud de la capitale. Le point culminant des « Chilterns Hills », à 181 m environ d'altitude, au nord, est donc moins moins élevé, et situé à 70 km environ.

A Londres, la Tamise est soumise à deux influences hydrologiques : fluviale et marine. La dernière, avec les marées quotidiennes, est plus forte que la première. Mais, les deux causes de crues peuvent surtout s'accumuler, rendant la zone urbaine du grand Londres, notamment à l'est, encore plus vulnérable.



D96. La géologie du bassin londonien



Sources : Ian West, 2000, d'après B. Horace, 1904, à partir du *Stanford's Geological atlas*, et du *Reynold's geological atlas* de 1860 et 1889

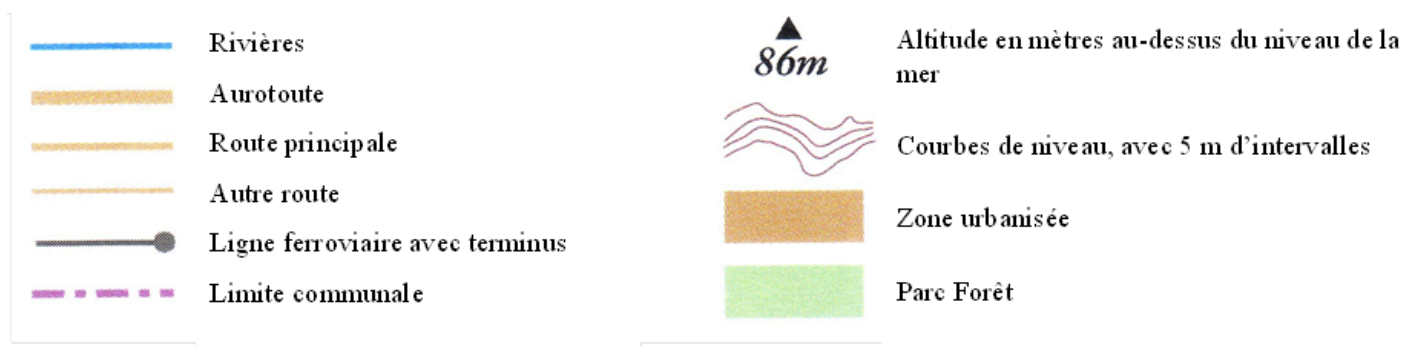
Modifications : BdF

2.4 La morphologie de la rive convexe de la boucle « Greenwich Reach-Erith Reach »

Après avoir regardé la carte ci-dessous, la vulnérabilité de la partie est de la région londonienne apparaît d'une façon spectaculaire. L'aléa « inondation », notamment en cas de fortes marées, serait susceptible de provoquer une catastrophe tant sur le plan humain que sur le plan matériel. Il n'est pas étonnant, d'ailleurs, que ce soit des Hollandais qui aménagèrent toute la zone appelée « Thames Gateway ». A la fin du XVIII^e siècle (au moins), ils avaient asséché la plupart des marais, afin de pouvoir amener leur bétail depuis la côte jusqu'au marché de Londres¹.

D'après Kevin Reid, responsable du service de l'hydrologie à Londres², il y a une hauteur de 6 m entre le niveau de la Tamise (à marée haute et lors des vives eaux) et les rues jouxtant les digues, sur la zone fortement urbanisée (logements, bureaux et hangars fluviaux) de Greenwich.

D97. Légende de la carte Relief de l'est de la région de Londres



¹ cf : "Shaping London", Terry Farrell, Ed. Wiley, Chichester (West Sussex), 2010, p 87.

² Entretien du jeudi 4 février 2010, à Londres.

D98. Relief de l'est de la région de Londres



Sources : *The landscape of London*, Anderson Geographics, 2009. Ordnance Survey

&



D99. Relief à Greenwich

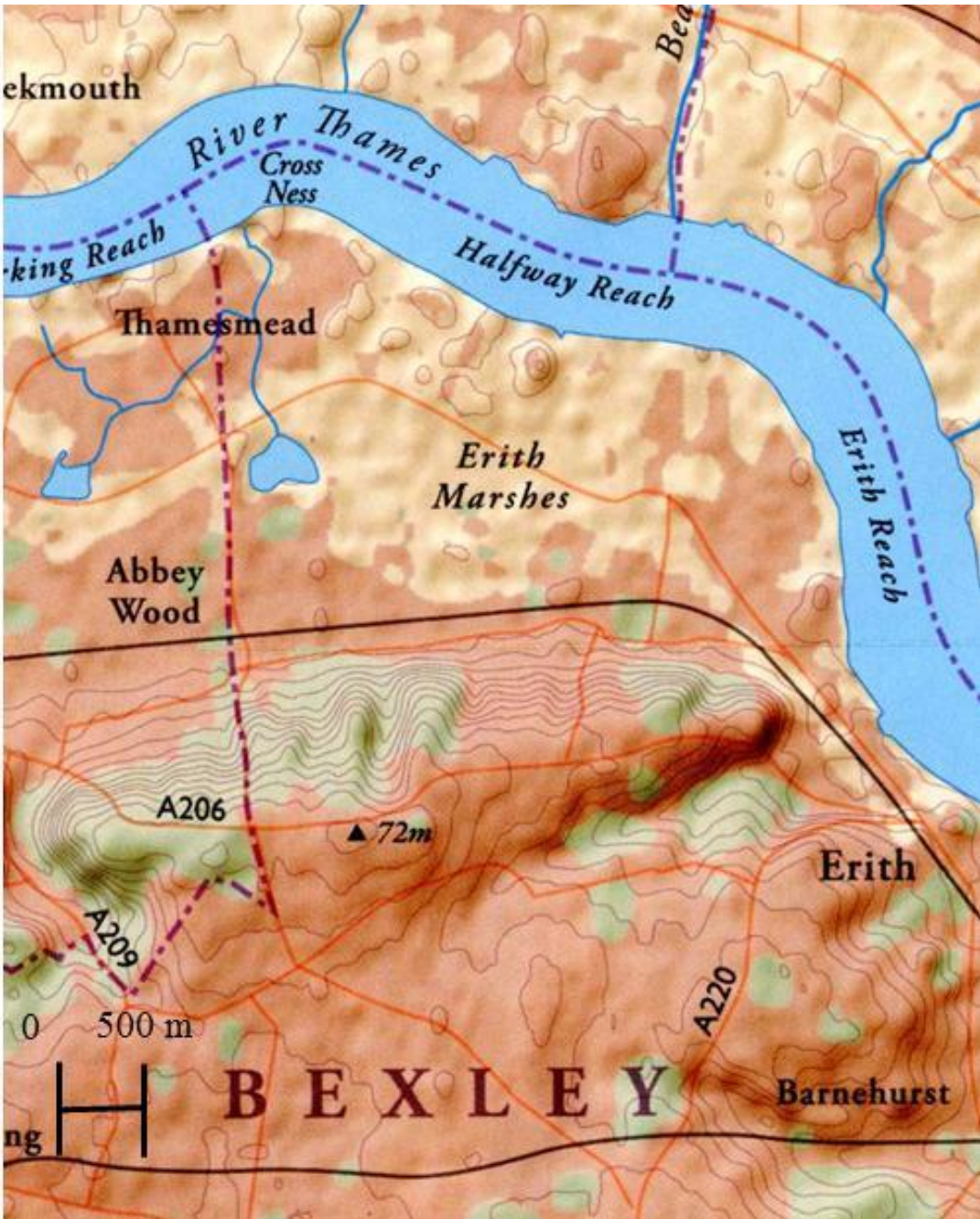
Point culminant à l'ouest de Greewich Park : 52 m.

On compte neuf courbes avant le rivage, ce qui fait un dénivelé de :

$$50 \text{ m} - (9 \times 5 \text{ m}) = 5 \text{ m}.$$

Les bords de la Tamise à cet endroit sont donc juste au niveau de l'eau, quand la Tamise à Londres est à marée haute. En effet, la hauteur d'eau à cet endroit est de 5 m, à marée haute.

Sources : *The landscape of London*, Anderson Geographics, 2009. Ordnance Survey



D100. Relief à Bexley

Point culminant au sud des Erith Marshes (marais) : 72 m.

On compte quatorze courbes avant le rivage, ce qui fait un dénivelé de :

$$70 \text{ m} - (14 \times 5 \text{ m}) = 0 \text{ m}.$$

Les bords de la Tamise à cet endroit sont donc en dessous du niveau d'eau, quand la Tamise à Londres est à marée haute. En effet, la hauteur d'eau à cet endroit est de 5 m au dessus du rivage, à marée haute, derrière les digues qui maintiennent le lit majeur.

Sources : *The landscape of London*, Anderson Geographics, 2009. Ordnance Survey.

3. Calcul de l'impact de l'urbanisation sur les crues

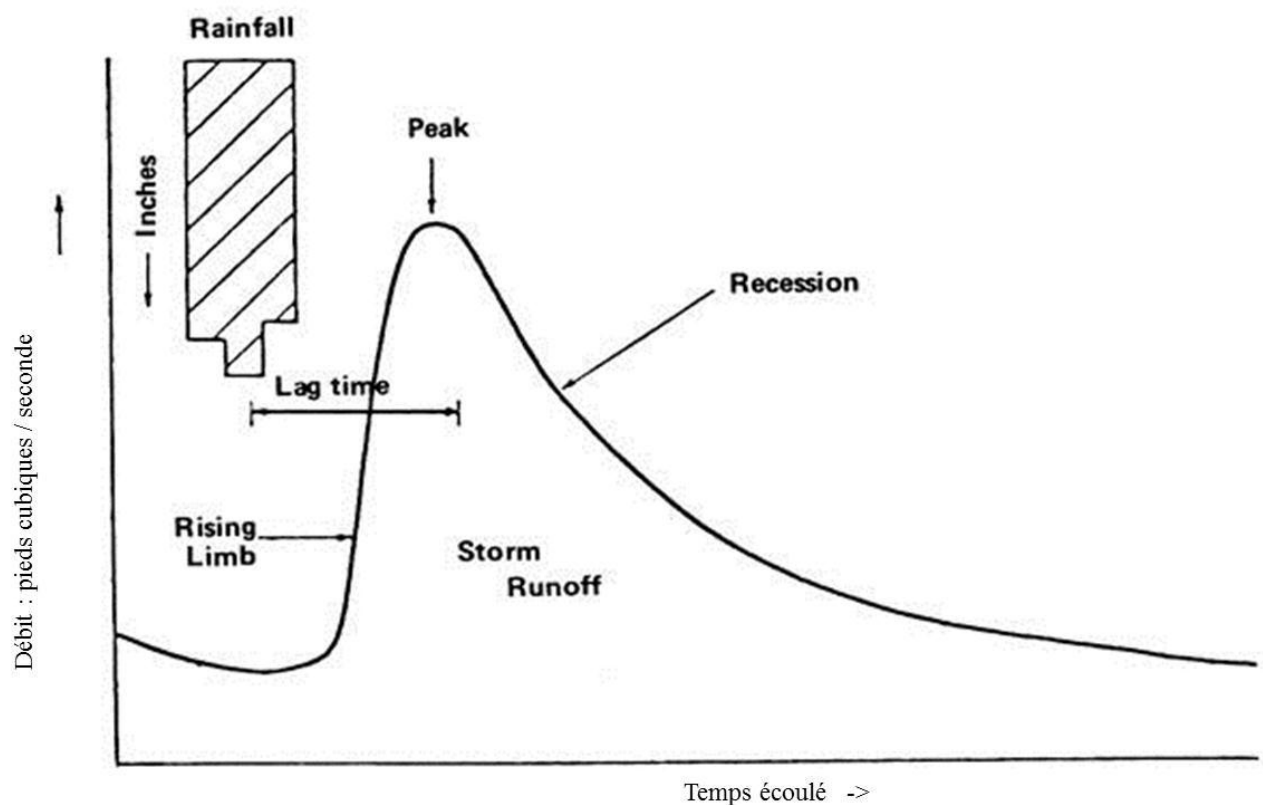
Calculer le facteur de risque de crues et de crues pluviales est pertinent pour les bassins fortement urbanisés. Nous pouvons prendre comme exemple le bassin parisien et plus particulièrement la rive droite de la « Boucle de la Seine » : le port de Gennevilliers et la plaine de Rueil dans les Hauts de Seine, et les rives de Chatou, Croissy sur Seine, et le Pecq dans les Yvelines. La morphologie géographique du bassin versant de la Seine en Ile-de-France et son étalement urbain le rendent sensible aux crues pluviales. Cependant, le drainage et la présence d'espaces végétalisés limite le risque d'inondation tant que la crue ne dépasse pas les capacités d'évacuation des barrages-réservoirs situés en amont. Ces barrages permettent de contenir l'équivalent de 70 cm de hauteur d'eau à Paris¹, si une crue centennale de type 1910 se reproduit. Gérard Mottet définit la Seine comme un « régime complexe différé² » : les différents aménagements (barrages, réservoirs, digues) contribuent à lisser les variations de débits issues des multiples aléas climatiques se produisant sur son bassin. Mais ces aménagement renforcent les risques en cas de crues exceptionnelles.

D'après Lazaro³, le niveau d'eau des crues pluviales, après une urbanisation et donc imperméabilisation des sols provoquée par cette urbanisation, est trois fois plus élevé que lorsque le sol est « naturel », c'est-à-dire non urbanisé. Un hydrographe simple (D101) montre l'évolution du débit d'une rivière, après des pluies suffisamment abondantes pour que la capacité d'infiltration soit saturée, et que les zones de stockage, naturelles (lacs, mares) et (ou) artificielles (bassins de rétention) soient remplies.

¹ *Le jour où l'eau reviendra, 100 ans après la grande crue de 1910*, Pascal Popelin, ed. J-C Gawsewitch, Paris, 2009, p 143.

² *Géographie physique de la France*, Gérard Mottet, ed PUF, Paris, 1993, 3^e ed, p 81

³ *Urban hydrology : a multidisciplinary perspective* (revised edition), Timothy R. Lazaro, ed. Technomic Publishing Co, Inc, USA, 1990.



D101. **Exemple d'un hydrographe.** Sources : Chorley, 1969

Rising limb : phase montante

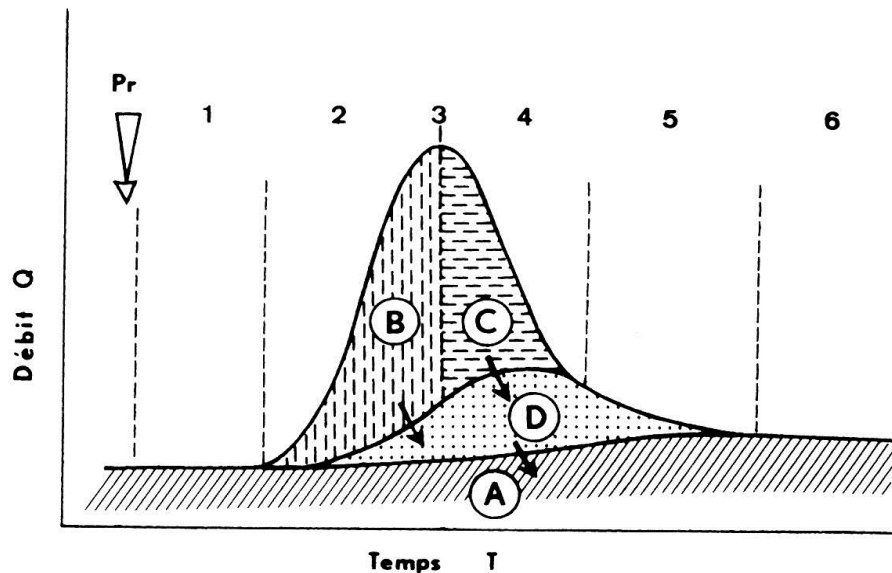
Storm runoff : ruissellement issu de la pluie

Inches : pouce (1 in = 2,54 cm $\approx$ 3 cm)

Lag time : temps intermédiaire (entre le début et le pic de la crue pluviale)

Ci-dessous, le dessin de Jean Demangeot¹ donne plus de détails sur les mécanismes de saturation et de refoulement souterrains et superficiels.

¹ *Les milieux « naturels » du globe*, Jean Demangeot, ed. Armand Colin, Paris, 2000-2002 10^e éd.



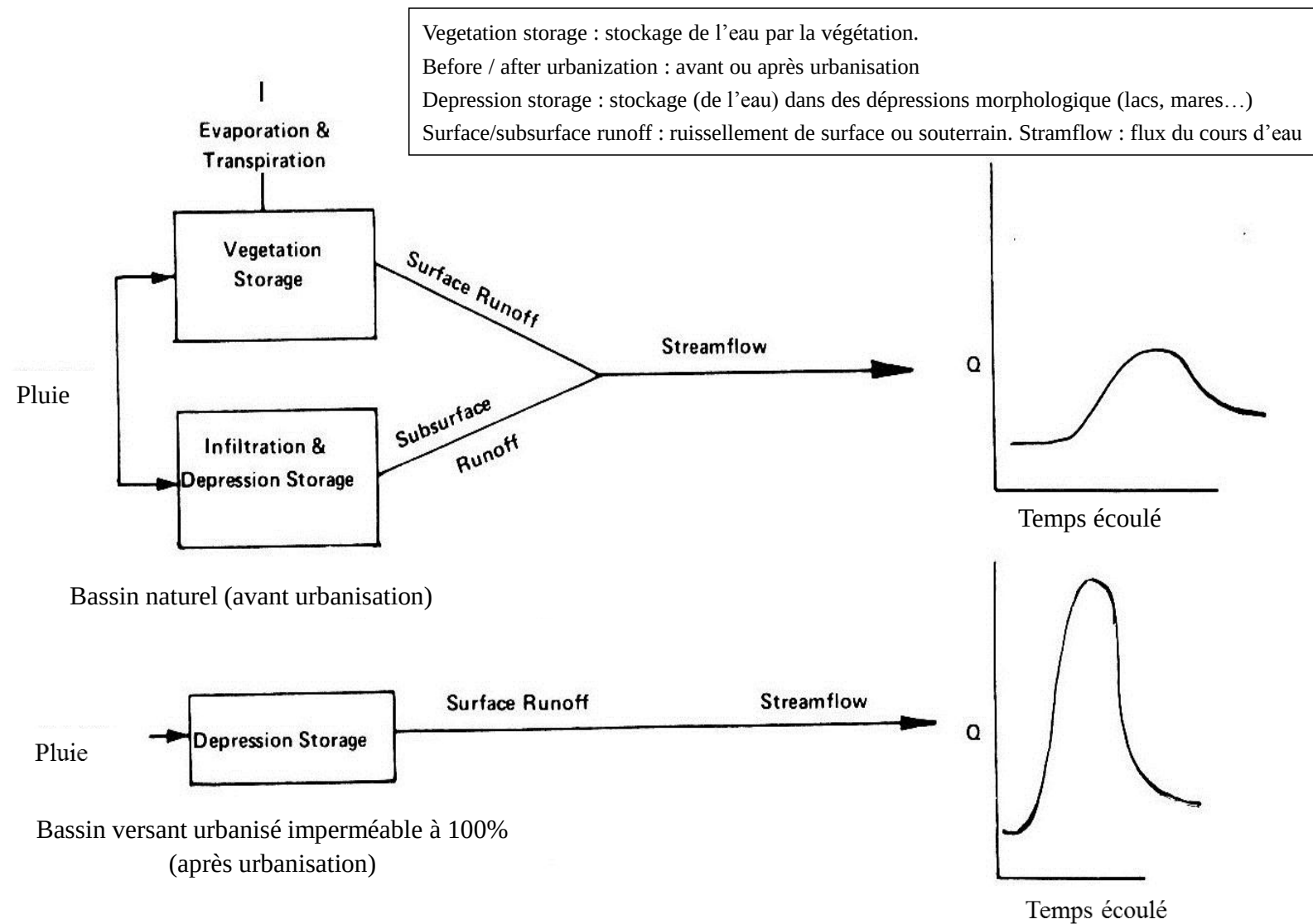
D102 — Une onde de crue.

En abscisse le temps T ; en ordonnée le débit Q : Pr est la pluie qui déclenche la crue. Phases de la crue : 1, débit normal soutenu par la vidange des nappes profondes A ; 2, début de la crue par arrivée de l'eau de ruissellement B ; 3, apogée de la crue ; 4, courbe de décrue soutenue par la vidange des eaux des affluents C ; 5, courbe de tarissement, soutenue par le « ressuyage » des eaux d'infiltration superficielles (nappe D) ; 6, reprise du débit normal par l'eau de nappe A. Les petites flèches : recharge des nappes D et A.

Source : *Géographie du cycle de l'eau*, Roger Lambert, Toulouse, presses universitaires du Mirail, 1996.

Lazaro¹ montre comment l'artificialisation du sol impliquée par l'urbanisation modifie la capacité de stockage en eau, souterraine et artificielle, d'un territoire. La réduction ou la disparition de la couverture végétale modifie le bilan stationnel. Elle diminue ou supprime l'infiltration. Elle augmente le ruissellement, et sur sa surface horizontale, son évaporation.

¹ *Urban hydrology: a multidisciplinary perspective* (revised edition), Timothy R. Lazaro, ed. Technomic Publishing Co, Inc, USA, 1990, p 20



D103. Comparaison entre des bassins versants naturel et urbanisé

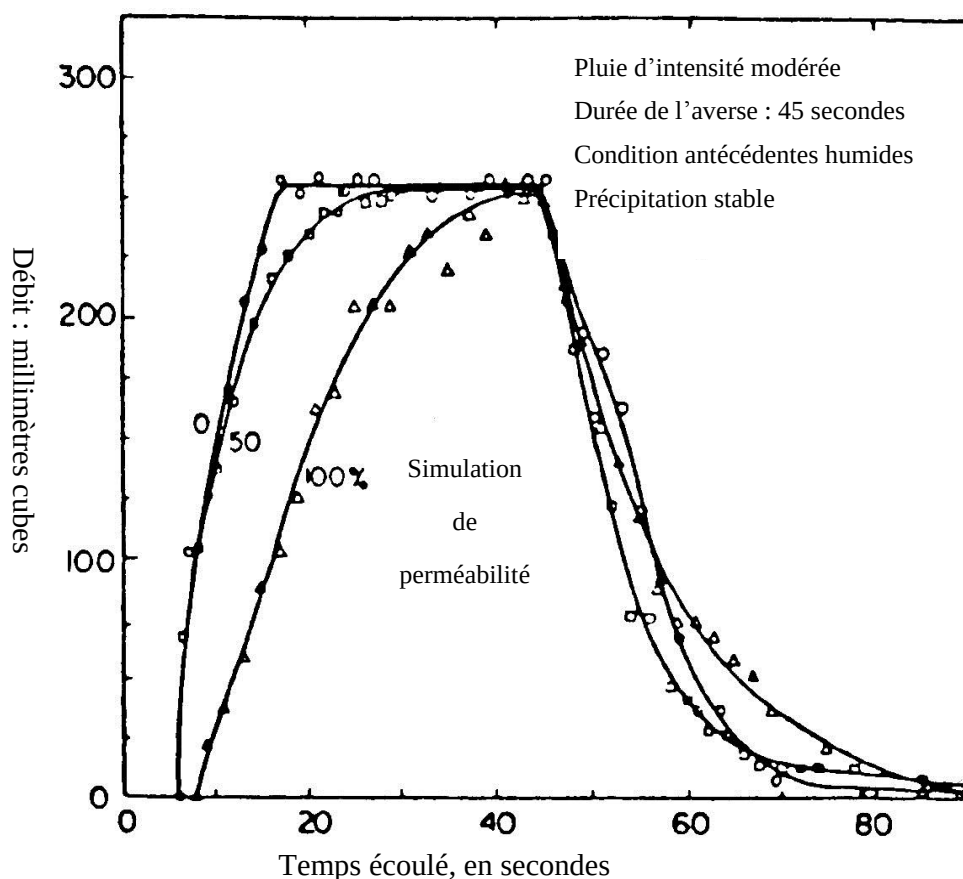
Le temps nécessaire pour atteindre le pic des débits, lors d'une crue pluviale sur sol artificialisé, représente un tiers du temps nécessaire sur sol perméable. Une échelle plus grande montre plus clairement l'accélération de l'atteinte du pic du fait de l'urbanisation (cf : schéma « Impact de l'urbanisation sur le débit fluvial »). En ordonnée, au lieu de calculer en pieds cubiques par seconde, on a un calcul de niveau en millimètre par seconde. En abscisse, au lieu de calculer le temps en heures, ce dernier est compté en secondes. Rappelons que :

$$1 \text{ ft}^3 = 0.028 \text{ m}^3 = 28 \text{ dm}^3 = 28 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$1 \text{ h} = 60 \text{ mn} = 3600 \text{ secondes}$$

L'échelle est donc agrandie.

D104. Impact de l'urbanisation sur le flux d'une rivière



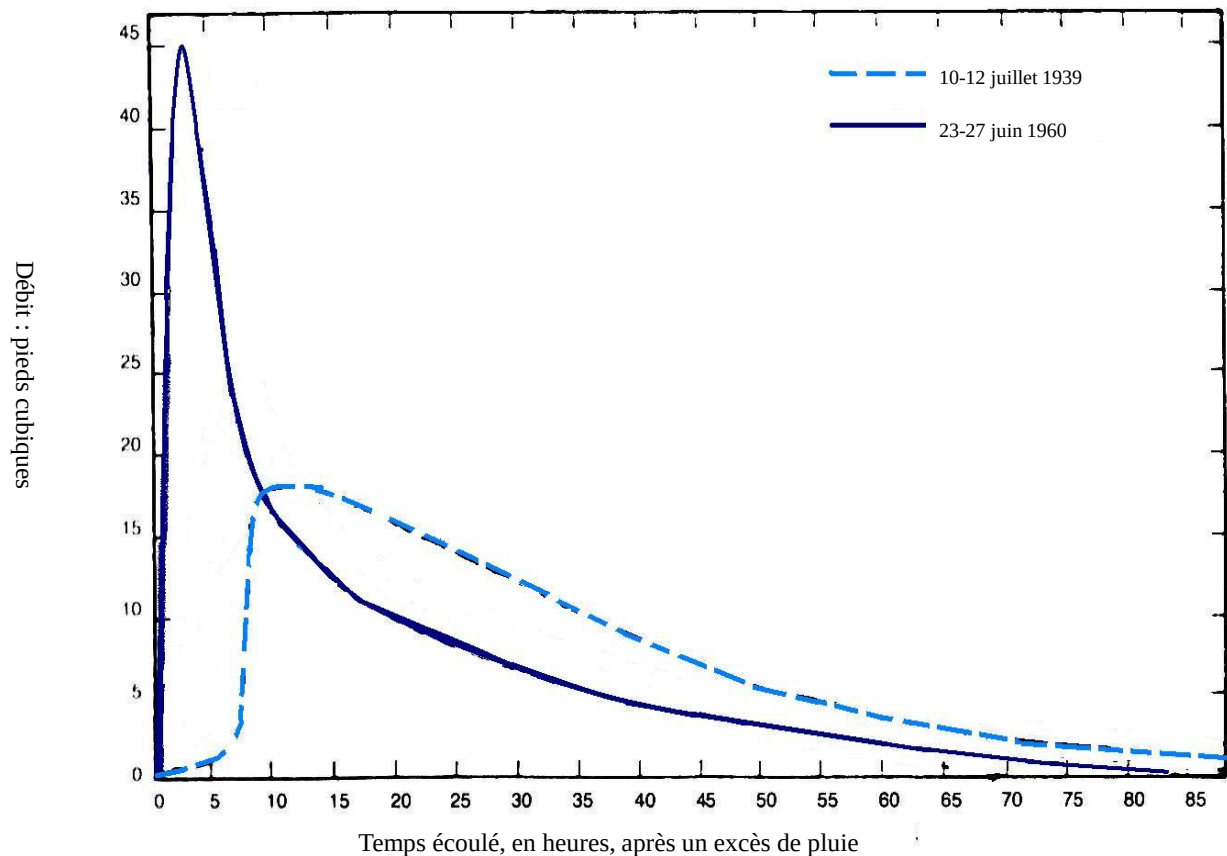
Un hydrographe comparant des surfaces avec une imperméabilité de 0,50 et 100%

Sources : Roberts et Klingeman (1970) (p 405).

Cela signifie que ce facteur d'accélération ne concerne pas que la hauteur du débit. Le débit ne dépassera pas le pic atteint (facteur de trois). En revanche, la vitesse, à laquelle ce débit sera atteint,

augmentera et aura un impact considérable. Non seulement le débit sera nettement plus élevé en zones urbanisées, mais la rapidité de cette montée sera également multipliée par trois. Concrètement, cela veut dire qu'en zones inondables, les secours devront être organisés de manière qu'ils puissent secourir plus vite plus de personnes, sur des zones plus grandes.

Pour des crues pluviales – c'est-à-dire qui arrivent après une pluie marquée - nous avons un facteur d'accélération de 9.



D105. Hydrographe simplifié (BdF) de deux ondes de crues pluviales avant (10-12 juillet 1939) et après (23-27 juin 1960) l'urbanisation

Sources: Moore and Morgan (1969). University of Texas Press (p 217). Simplifications : BdF

Mais que se passe-t-il si cette crue pluviale arrive à une époque de hautes eaux?

Le régime de la Seine à Paris s'inscrit entre des hautes eaux moyennes de 545 m³/s et des basses eaux moyennes de 94,5 m³/s. Le rapport est de 5,7 que nous arrondirons, pour faciliter les calculs, à 6.

Le schéma « Régime de la Seine à Paris¹ » montre que les précipitations à Paris oscillent entre 50 et un peu plus de 70 mm par mois. Les variations sont faibles, en comparaison des zones tropicales avec une saison des pluies (le Sénégal par exemple). Par contre, les débits passent de 100 m³/seconde au mois d'août à environ 550 m³/seconde en février. Ce ne sont pas les précipitations qui provoquent cette différence, mais l'évaporation, puisque l'on passe d'une température moyenne de 18 °C environ pour le mois d'août à moins de 5°C pour le mois de février, c'est-à-dire moins d'un tiers de la chaleur estivale. Les hivers, dans la région parisienne (zone tempérée), sont propices non seulement aux hautes eaux habituelles, mais également aux crues exceptionnelles.

Le facteur de risque fluvial, pour le bassin versant d'un fleuve de régime moyen, en zone tempérée humide, après une pluie marquée, et entre le début d'urbanisation (niveau 0 %) et l'imperméabilisation totale du sol (niveau 100 %), se calcule de la manière suivante :

pic crue pluviale (f^*q_{crue}) = débit initial x 3 → 3 est le facteur de crue ou encore : f^*q_{crue} = débit crue / débit avant crue = 3 f^*q_{crue} = dérivée d'une crue ponctuelle = $(y_2 - y_1 / x_2 - x_1)$	} Bassin versant naturel
vitesse crue pluviale (V_{max}) = vitesse initiale x (temps initial/temps de crue) = vitesse initiale x 3 → 3 est le facteur de vitesse	
rapport entre débits extrêmes (f^*Q) = débit initial x 5 → 5 facteur des débits extrêmes ou encore : f^*Q = débit hautes eaux / débit basses eaux = 6 f^*Q = dérivée des débits extrêmes = $(y_2 - y_1 / x_2 - x_1)$	

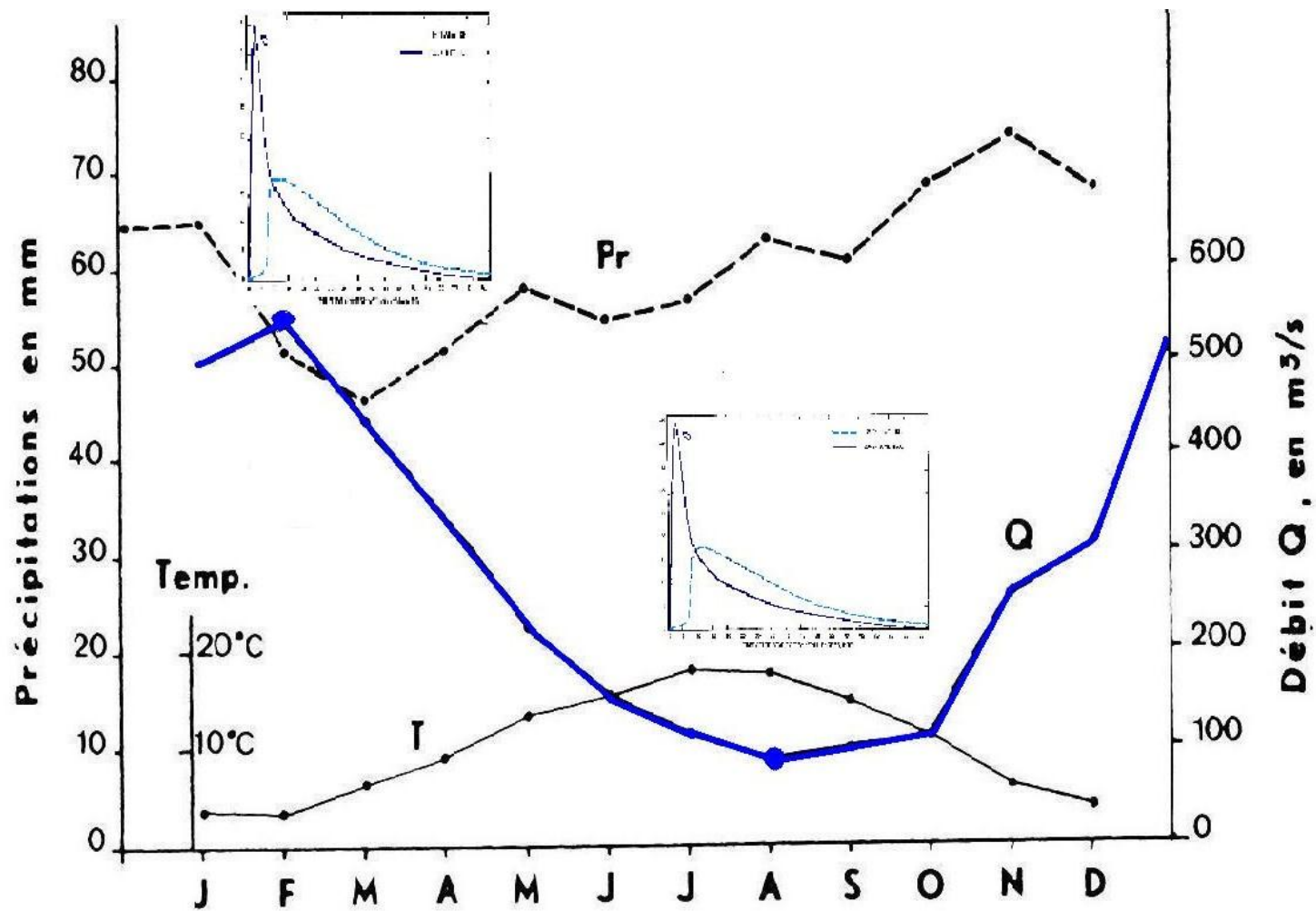
Ce qui donne le calcul suivant :

$$\frac{f_{q_{crue}}}{3} \times \frac{V_{max}}{3} \times \frac{f_Q}{6} = f_{hydraulique} = 54.$$

Le facteur de risque hydraulique, pour un fleuve de régime équivalent à la Seine, est de 45. Le rapport entre débits extrêmes de la Seine, à Paris, est relativement peu contrasté (5,7), en comparaison de celui du Nil (14,5) à Ouadi Halfa (nord du Soudan), par exemple. Donc, même dans le cadre d'un régime moyen, nous avons un facteur important entre deux situations :

- une position de risque d'inondation très faible - basses eaux au mois d'août sur un territoire « naturel »
- une autre de risque fort - hautes eaux au mois de février sur une zone complètement artificialisée

La prise en compte de l'ensemble des sous-éléments de ce facteur de risque fluvial rend compte de l'impact de l'urbanisation et des risques globaux d'inondation. A cela, il faudrait ajouter les situations de crues exceptionnelles (1910 à Paris) ou le calcul du rapport des débits extrêmes pour les fleuves aux régimes très contrastés.



Le régime de la Seine à Paris

D106. Sources : *Les milieux « naturels » du globe*, Jean Demangeot, ed. Armand Colin, Paris, 2000-2002 2e éd, p 59.

Ajouts : BdF.

4. La vulnérabilité matérielle face aux inondations

4.1 Le facteur de croissance de l'urbanisation

Le Calcul du facteur de croissance urbaine (symbolisé f_{urb}) procède d'une comparaison entre la surface urbanisée de l'Ile de France et celle au tout début de la révolution industrielle. Analyser l'évolution de l'urbanisation d'un territoire est un outil pour évaluer l'ampleur des dégâts matériels que peut causer une inondation sur ce territoire. Plus une inondation recouvrira de zones urbaines, plus d'habitations, de bâtiments publics, d'usines, entrepôts et commerces risquent d'être affectés.

○ L'exemple francilien

L'Ile-de-France s'étend sur 12.000 km² et sa comprend 11.3 millions d'habitants. Le Calcul du facteur de croissance urbaine (symbolisé f_{urb}) procède d'une comparaison entre la surface urbanisée de l'Ile de France et celle au tout début de la révolution industrielle. Analyser l'évolution de l'urbanisation d'un territoire est un outil pour évaluer l'ampleur des dégâts matériels que peut causer une inondation sur ce territoire. Plus une inondation recouvrira de zones urbaines, plus d'habitations, de bâtiments publics, d'usines, entrepôts et commerces risquent d'être affectés.

D107. Evolution de la taille de Paris ¹		
Epoques	Superficie de Paris (intra-muros) en hectares	Superficie de Paris (intra-muros) en km ² (1 hect = 0.01 km ²)
Gallo-romaine (52 av J-C – Ve siècle)	52	0,52
XIIIe	250 à 273	2,50 à 2,73
XVIIe	1000	10,00
1859 (juste avant l'annexion)	3402	34,02
1860 (enceinte de Thiers)	7802	78,02
Aujourd'hui	10539	105,39

Avant l'industrialisation – commencée à la fin du XVIIIe siècle – l'urbanisation était limitée approximativement à l'enceinte des fermiers généraux, c'est-à-dire une superficie de 3402 hectares. L'avenue de la Grande Armée fut construite en 1772 (jusqu'au pont de Neuilly)², ce qui montre bien le niveau d'urbanisation en 1800 dans la zone correspondant à l'actuelle petite couronne. Autre exemple : Emile Zola, dans *Le ventre de Paris*, évoque l'acheminement des fruits et légumes depuis Nanterre jusqu'aux Halles. Or ce roman, publié en 1873, décrit l'activité des Halles et les pavillons de Victor Baltard construits entre 1854 et 1870, à une époque où l'urbanisation avait déjà beaucoup progressé depuis le tout début du XIXe siècle.

Le facteur de croissance de l'urbanisation francilienne peut s'établir comme le rapport entre la superficie construite vers 1800 – essentiellement le Paris de Thiers - et la superficie urbanisée de l'Ile-de-France actuellement. La surface francilienne est de 12.011 km². Si l'on réduit la superficie de l'Ile de France à uniquement celle qui est strictement urbanisée, il faut multiplier ces 12.011 km² par 25%. En effet, et ce malgré l'avancée de l'urbanisation, les trois quarts du territoire francilien sont des espaces agricoles ou verts³. Considérer ces espaces non urbanisés comme des territoires à faible valeur ajoutée serait une erreur : ils sont synonymes de production agricole, de lieux de détente (pour les forêts) et ils apportent aux zones voisines une véritable valeur foncière. Mais dans

¹ *Atlas de Paris; évolution d'un paysage urbain*, Danielle Chadych, Dominique Leborgne, Jacques Labar, ed Parigramme, Paris, 1999, p 8.

² Cf : www.parisrama.com/thematiques/pages_histoire/capitaleurop.htm, juillet 2010.

³ « Carte de l'Ile de France », *Atlas Nathan*, direction Jacques Charlier, ed Nathan, Paris, 2006, p 23

un but de simplification, et afin de proposer un calcul plutôt à la baisse de la valeur économique d'un territoire, nous ne retiendrons que les zones strictement urbanisées et les parcs urbains.

Les zones urbanisées franciliennes ont donc actuellement la superficie approximative suivante :

$$12.011 \text{ km}^2 \times 0,25 = 3003 \text{ km}^2$$

On divise cette superficie par celle de la zone urbanisée parisienne de 1859, c'est-à-dire celle juste avant l'annexion de communes avoisinantes en 1860 :

$$3003 \text{ km}^2 / 34,02 \text{ km}^2 = 88,27$$

$$\text{Pour L'Ile de France : } \text{Urb}_{2010} / \text{Urb}_{1800} = f_{\text{urb}} (\text{idf } 2010-1800) = 88,27$$

Entre 1800 et 2009, le territoire urbanisé francilien a été multiplié par 88. Le facteur de croissance urbaine est de 88.

○ Pour la région londonienne

La superficie de Londres en 1800 était de 305 km². Cela correspond aujourd'hui à « l'Inner London ». La superficie de la zone urbaine de Londres aujourd'hui est de 16.256 km². Elle est nommée « Metropolitan area » et correspond à peu près à l'Ile de France.

Le Calcul du facteur de croissance urbaine (symbolisé f_{urb}) est :

$$f_{\text{urb}} (\text{Londres}) = 16.256 \text{ km}^2 / 305 \text{ km}^2 = 53,30$$

Parce que la Grande-Bretagne est très centralisée, la zone d'influence entière de Londres est plus grande que la zone métropolitaine (« Metropolitan area »). Cette influence s'étend sur toute la région du sud-est (27.473 km²) de l'Angleterre, et même au-delà. La capitale britannique tisse des réseaux qui se concrétisent par un développement de l'urbanisation et des lignes de transport. Il n'est même pas rare que des habitants des comtés situés à l'extérieur de cette région du sud-est parcourent plus de 200 km aller-retour quotidiennement pour venir travailler à Londres. L'université de Cambridge (dans le Cambridgeshire) est localisée à l'extérieur de cette région également. Pourtant, sans Londres, elle ne pourrait avoir son prestige scientifique. Si l'on prend en compte cette zone d'influence – le sud-est de l'Angleterre - le facteur de croissance urbaine est plus fort, car il faut faire le rapport entre la zone urbanisée londonienne de 1800 et la zone d'influence immédiate de la capitale britannique.

$$f_{\text{urb}} (\text{S.E UK}) = 27.473 \text{ km}^2 / 305 \text{ km}^2 = 90,08$$

Cependant, on partira d'une estimation basse pour calculer le facteur de croissance de l'urbanisation. La zone urbanisée londonienne (plus petite que la zone d'influence) correspond d'avantage à celle de la « Métropolitan area ». On choisit donc le rapport entre la superficie de l'actuelle « Metropolitan area » (16.256 km²) et celle de Londres en 1800 (305 km²), ce qui donne le facteur 53.

○ Comparaison des deux régions

La région du sud-est de l'Angleterre (« South East economic planning region ») est différente de celle du Bassin Parisien (au sens géographique). La densité est moindre (669 h/km²) et il n'y a que deux grandes villes dans un rayon de 150 km : Birmingham et Bristol. L'urbanisation de cette zone a tendance à s'étendre, dans la mesure des moyens techniques et organisationnels de transport en commun (train de banlieue, métro, bus) et individuels (péages urbains), et du fait que Londres est le principal bassin d'emplois de Grande-Bretagne.

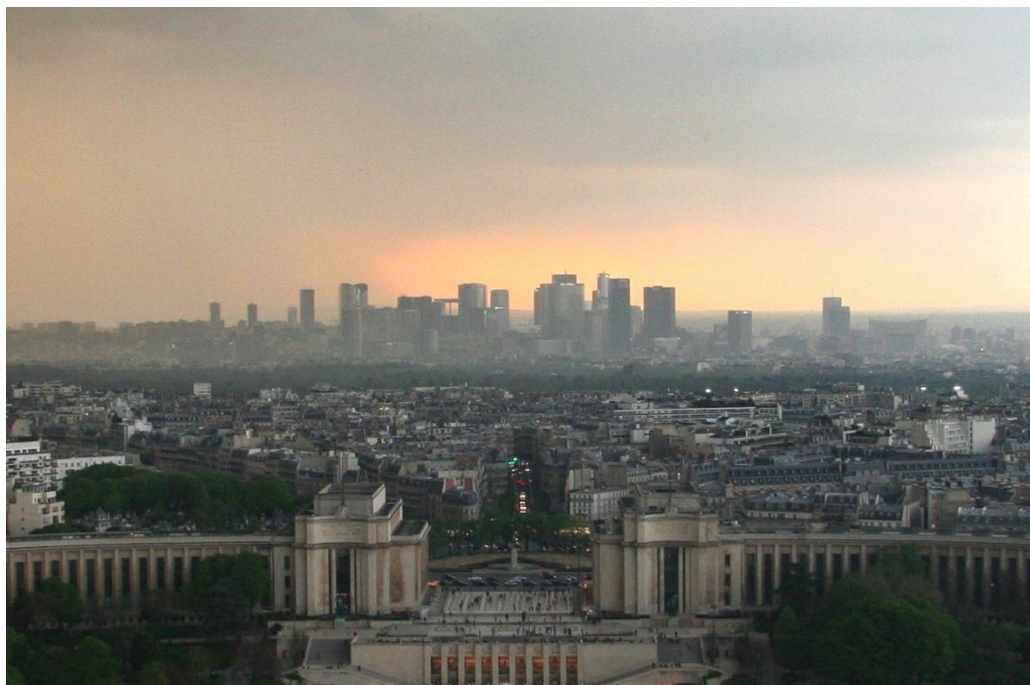
Par contre, dans le Bassin Parisien, nous avons Orléans, Rouen, Amiens et Reims situés à environ 150 km de la capitale. De plus, avec le TGV, Lille est à 1 heure de train de Paris, Metz et Nancy à 1H15. Bien sûr, à ce temps de trajet, il faut rajouter les temps de correspondance aux gares de départ de d'arrivée, ce qui peut aller jusqu'à doubler le temps théorique en train. Il n'empêche que « l'effet TGV » participe grandement à attirer de nouveaux professionnels vivant en province, quelque fois appelés les « rurbains ». Cela contribue à limiter – dans une certaine mesure – l'urbanisation francilienne au profit des villes régionales situées sur la périphérie de l'Ile de France.

En termes de superficie et de population, on comparera la région du sud-est de l'Angleterre (27.473 km² et 18 M.hab) à l'Ile de France (12.000 km² et 11,6 M.hab). La région francilienne a une zone d'attractivité quotidienne qui s'étend à un cercle défini par les villes situées environ à 150 km de Paris ou bien à 1H15 maximum de TGV : Reims, Metz, Nancy, Orléans et Tours, Rouen et Le Havre, Amiens, Lille et son agglomération.

4.2 4.2 Le facteur de croissance du Produit Intérieur Brut (PIB)

Le PIB de la région parisienne en 2007 était de 552,7 milliards d'euros, ce qui faisait d'elle la 17^e

économie mondiale¹, juste après celle de la Hollande. Elle est la première zone urbaine de l'Union Européenne en termes de PIB.² Au 1^{er} janvier 2006, l'Euro valait à peu près 1,32 dollar. Le PIB francilien était donc de 552,7 milliards d'euros, c'est-à-dire 729,6 milliards de dollars américains.



D108. Le quartier de la Défense, vu depuis la Tour Eiffel³.

Ce quartier d'affaires (3,35 millions de m² de bureaux) est le plus grand d'Europe et se situe au bord de la Seine, en aval de Paris.

Le PIB français en 1800 était de 1388 \$ (valeur 2005) par habitant⁴.

Population française en 1800 $\approx$ 30 M.hab (29.620.167 habitants exactement)

Le PIB français en 1800 était donc de 41,11 milliards de US \$ (valeur 2005).

Le PIB britannique en 1800 était de 2717 \$ (valeur 2005) par habitant⁵.

Population britannique en 1800 $\approx$ 15 M.hab (14.687.880 habitants exactement)

Le PIB britannique en 1800 était donc 39,90 milliards de US \$ (valeur 2005).

Si nous partons du principe - théorique - que Paris et Londres représentaient 1/5^e de leur PIB

¹ *Produits Intérieurs Bruts Régionaux (PIBR) en valeur en millions d'euros* (XLS). Institut National de la Statistique et des Études Économiques. Information extraite le 10/02/2010

² *World Urbanization Prospects: the 2007 Revision Population Database*, The United Nations. <http://esa.un.org/unup/index.asp?panel=2>. Le 21 Novembre 2009.

³ Sources : wikipedia. Auteur : [Bigal888](#) ? Date : 2006 ?

⁴ Sources : <http://www.gapminder.org/world/>

⁵ Sources : <http://www.gapminder.org/world/>

national, nous pouvons faire le calcul suivant :

PIB Paris1800 = PIB France 1800 / 5 = $41,11 \times 10^9 \$$ / 5 = 8,22 milliards de US \$ (valeur 2005)¹.

PIB Londres 1800 = PIB UK 1800 / 5 = $39,90 \times 10^9 \$$ / 5 = 7,98 milliards de US \$ (valeur 2005).

Le facteur de croissance de la vulnérabilité matérielle (PIB francilien) sera symbolisé $f_{\text{PIB}}(\text{idf})$

$f_{\text{PIB}}(\text{idf } 2008-1800) = (\text{PIB}_{\text{idf } 2008} / \text{PIB}_{\text{idf } 1800}) = (729,6 / 8,22) \times 10^9 \$ \text{ constants}_{2005} = 88,75$.

Le facteur de croissance de la vulnérabilité matérielle (PIB londonien) sera symbolisé $f_{\text{PIB}}(\text{Londres})$

$f_{\text{PIB}}(\text{Londres } 2008-1800) =$

$(\text{PIB}_{\text{Londres } 2008} / \text{PIB}_{\text{Londres } 1800}) = (729,6 / 7,98) \times 10^9 \$ \text{ constants}_{2005} = 91,43$

Le facteur de croissance de la vulnérabilité matérielle, si l'on prend en compte l'indice du PIB, est de 89 pour l'Ile de France; de 92 pour Londres. Ces énormes facteurs s'expliquent par le fait que l'on part de la période pré-industrielle à celle de l'ère des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). Comme dit auparavant, d'aucuns veut faire la remarque que cette période est trop longue et contient trop de changements pour être pertinente pour des calculs de facteur de vulnérabilité. Cependant, si l'on prend en compte la vitesse de l'évolution technologique, cet argument ne tient que peu. La moitié des inventions technologiques ont été inventées ces 50 dernières années. Dès lors, analyser sur le long terme permet – peut-être – de mieux affronter « l'accélération du temps ».

4.3 Pondération des facteurs de croissance urbaine et du PIB

Dans les exemples francilien et londonien, on observe une corrélation entre la croissance urbaine et celle du PIB. Comme une des causes – ou conséquence ? – du développement d'une ville est de produire de la richesse, le fait que les deux facteurs soient de même ordre de grandeur peut sembler normal et même confirmer le raisonnement et le calcul. Cependant, il se peut que dans une région et une époque donnée, la croissance urbaine aille plus vite que celle du PIB. Il suffit que l'économie locale repose sur des productions à faible valeur ajoutée et nécessite beaucoup de main d'œuvre. On verra alors, dans une ville contemporaine, des bidonvilles. Si par contre, une ville se spécialise dans la haute technologie et les services financiers, et limite sa population étrangère aux seuls actifs ayant un emploi (plus leur familles s'il y a lieu), comme c'est le cas pour la Suisse ou les Emirats Arabes Réunis (Dubāi) avant la crise de 2008, alors la tendance sera inversée : le PIB croîtra plus vite que l'urbanisation et la population.

¹ 1 G.\$ = 1 milliard de dollars américains

Afin de pouvoir calculer le facteur de vulnérabilité matérielle (symbolisé par « R_e » ou « R_s » si les PIB sont calculés en dollars constants), nous prenons en compte le facteur de croissance urbaine et celui du PIB.

$$R_s = \sqrt{(f_{urb} \times f_{PIB})}$$

Pour le cas de l'Ile de France entre 1800 et 2008 :

$$R_s = \sqrt{(f_{urb} \times f_{PIB})} = \sqrt{(88,27 \times 88,75)} = 88,51.$$

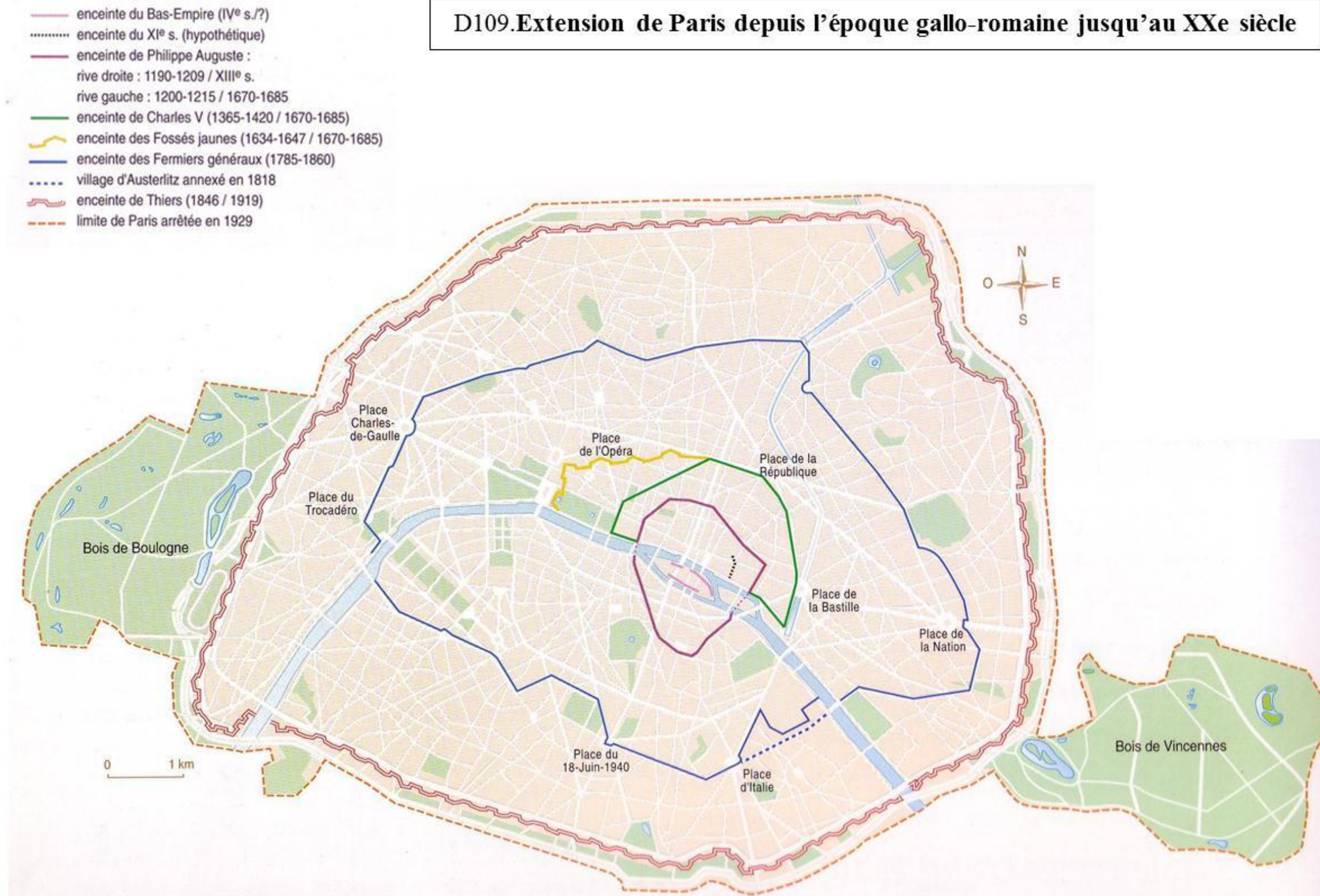
Pour le cas de Londres (« Metropolitan Area ») entre 1800 et 2008 :

$$R_s = \sqrt{(f_{urb} \times f_{PIB})} = \sqrt{(53,30 \times 91,43)} = 69,81$$

Pour les cas de Londres et Paris, les deux mégalofoles ont vu leur croissance urbaine et économique progresser ensemble. Le facteur de croissance de l'urbanisation londonienne est inférieur à celui de Paris du fait de la moindre densité urbanistique dans la capitale britannique. Les facteurs de vulnérabilité matérielle (urbanisation et économie) sont forts pour les deux capitales, puisque l'on passe d'un facteur 1 à 69 depuis le début de leur croissance industrielle et financière. Tout projet urbanistique, qui se construit à l'intérieur du réseau urbain des deux capitales, s'inscrit dans ce contexte de risque.

Ci-dessous une carte montre les frontières historiques de Paris et de l'ancien département de la Seine. Ce document montre la superficie de la zone urbanisée vers 1800, au tout début de l'industrialisation et du développement de l'urbanisation. Cette carte donne un aperçu de la zone dense – donc vulnérable - aux inondations, en partant du principe que toute la zone dense est concernée par les inondations, du fait que de nombreux réseaux urbains y sont implantés.

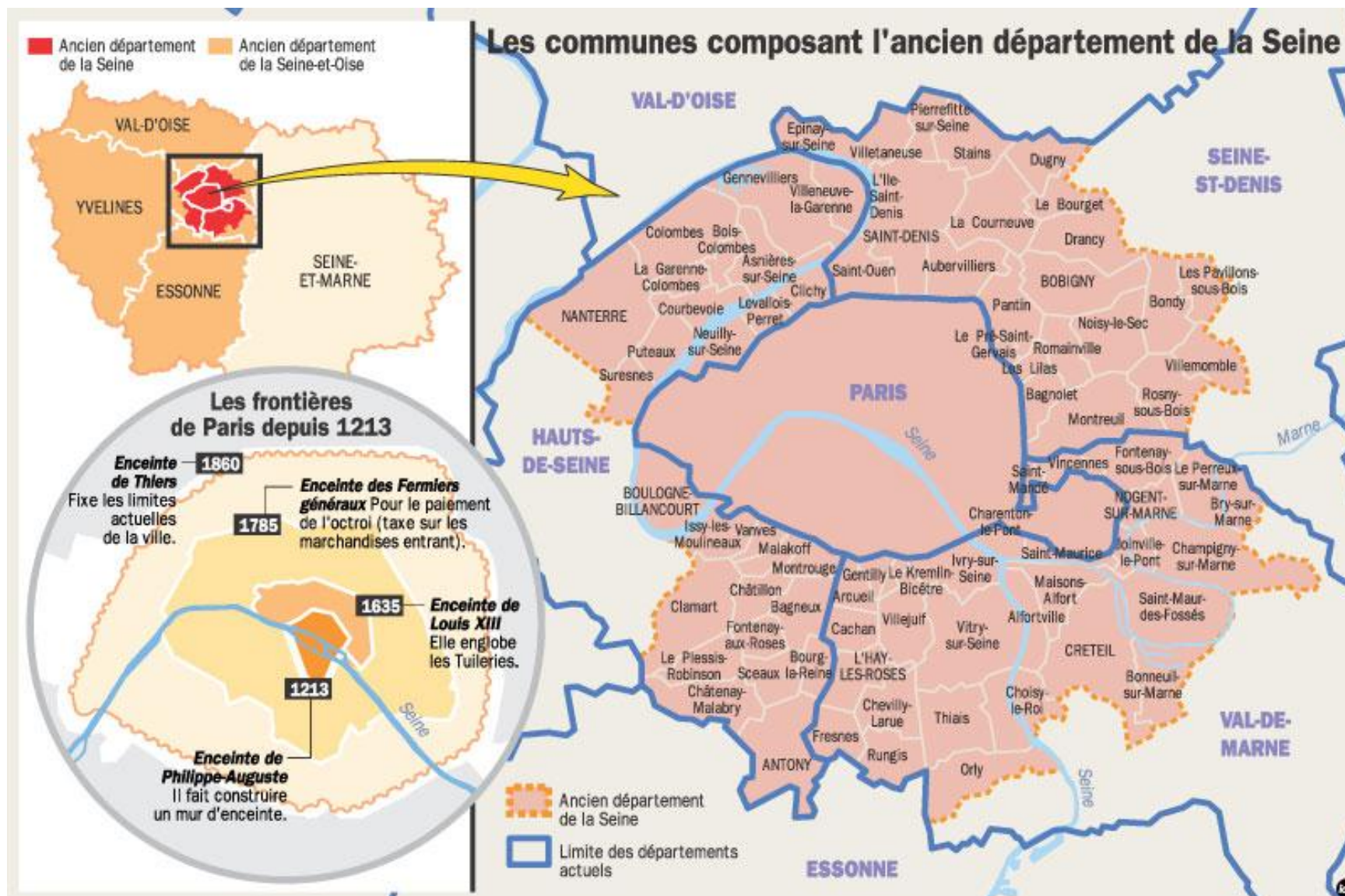
D109.Extension de Paris depuis l'époque gallo-romaine jusqu'au XXe siècle



Sources : *Atlas de Paris ; évolution d'un paysage urbain*, Danielle Chadych, Dominique Leborgne, Jacques Labar, ed Parigramme, Paris, 1999, p 8.

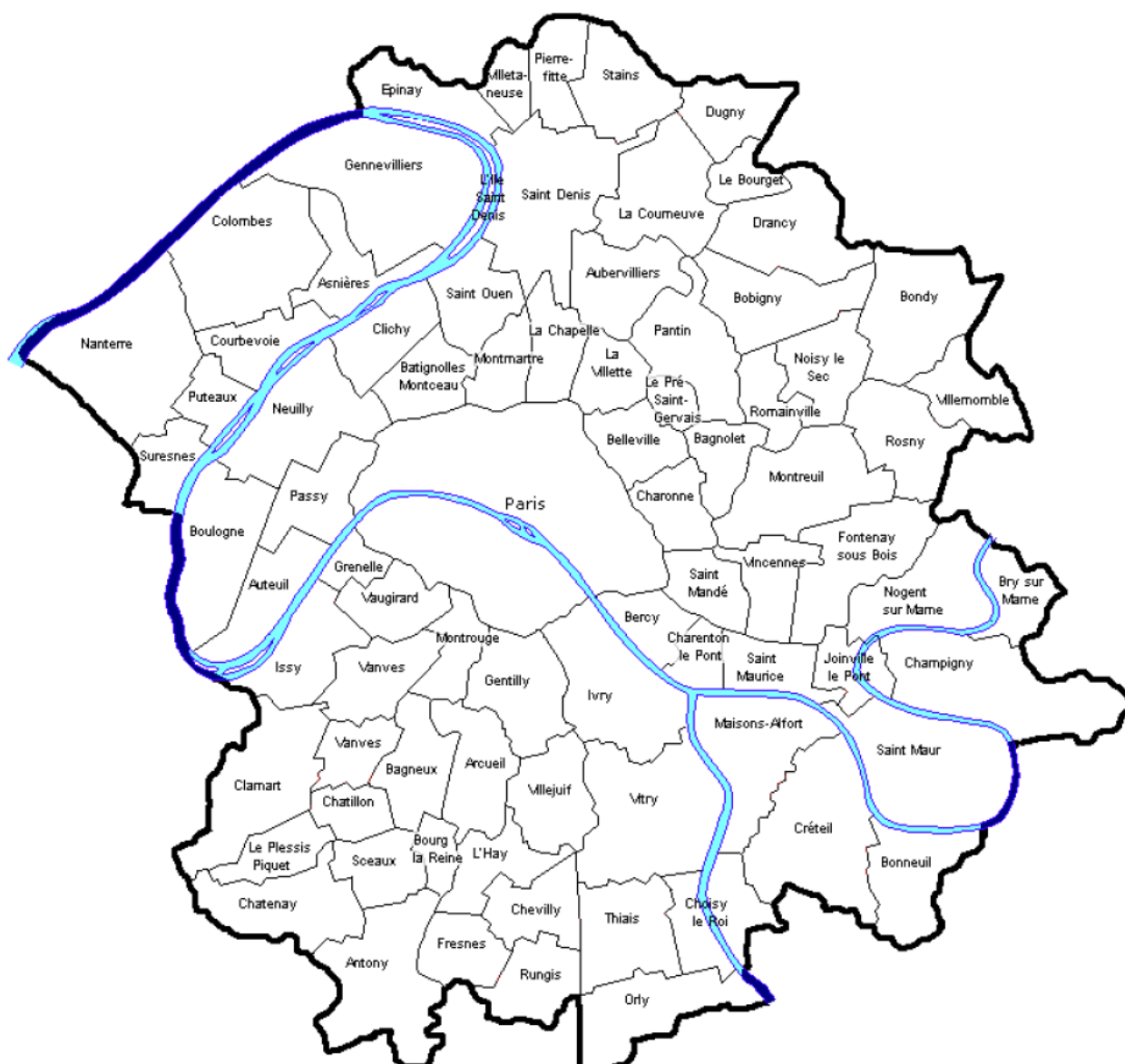
Jusqu'à la fin du XIXe siècle, la zone périurbaine de Paris s'étendait jusqu'à la limite du territoire correspondant à la première couronne actuelle. A titre d'exemple, il y avait des maraîchers à Montreuil, progressivement remplacés par des logements ouvriers. A l'ouest, en 1870, les parcelles agricoles commençaient à Puteaux ou Nanterre.

&

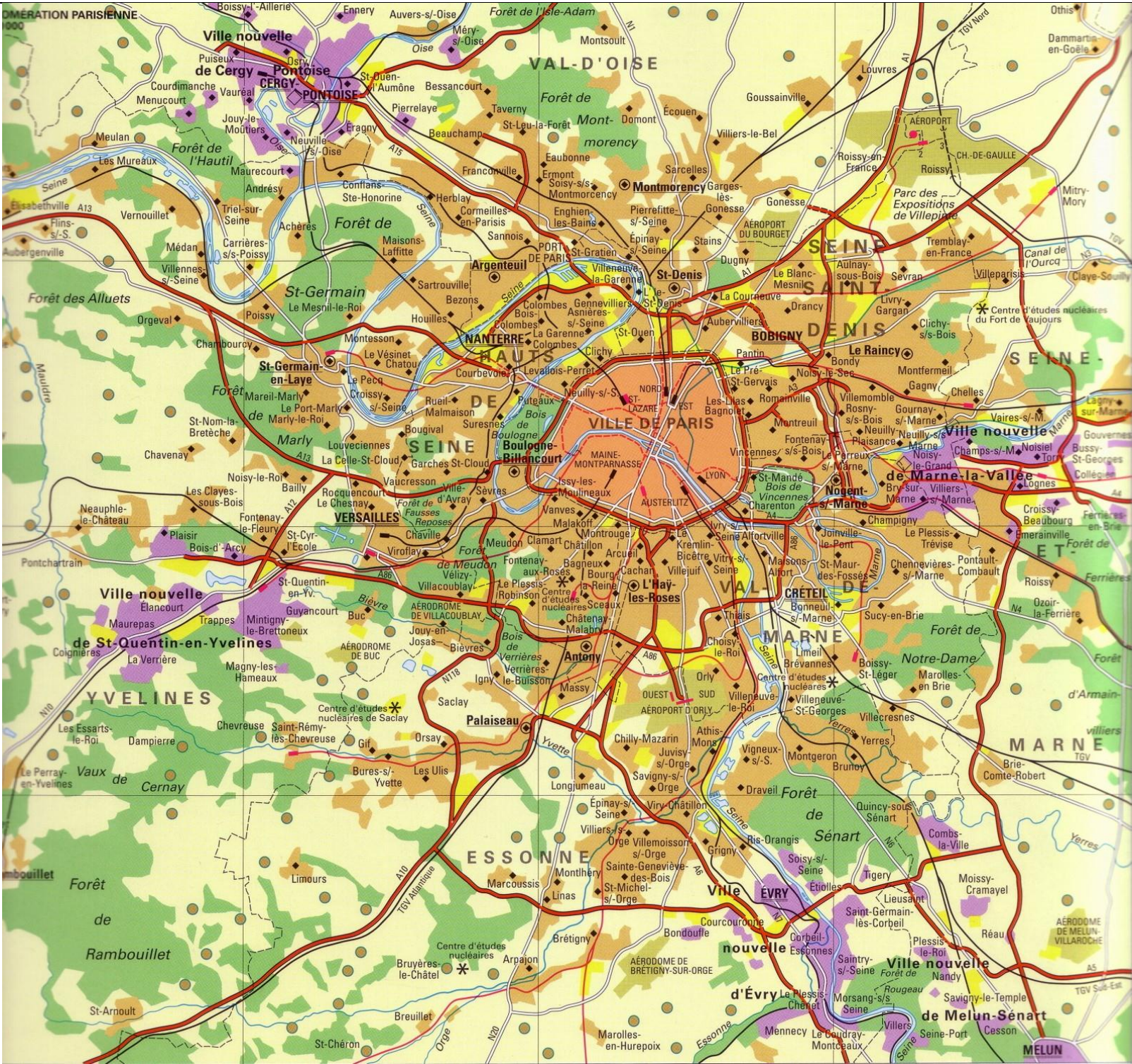


D110. Sources : *Agir sur les grands territoires*, Ariella Masbouni, David Mangin, Coll « Ville-aménagement » n°5, ed Le Moniteur

D111. Carte du département de la Seine et ses communes en 1800



Sources : wikipedia, site de Paris



La carte de l’Ile-de-France ci-dessus montre les zones urbaines et périurbaines (représentées en marron) de l’Ile-de-France aujourd’hui. Elles tendent à rejoindre les « villes nouvelles » (zones violettes). Ces dernières furent conçues à l’origine bien en-dehors de la zone urbaine francilienne, afin qu’elles puissent avoir leur propre développement urbain, et ne soient pas que des banlieues-dortoirs de la capitale.

L’urbanisation s’est considérablement agrandie depuis Haussmann, augmentant du coup la vulnérabilité de la région aux risques.

Zone urbanisée de la région parisienne

Localité rattachée à une ville nouvelle

Localité en zone rurale

Voie ferrée et gare

Réseau-express-régional (RER)

Limite de département

MELUN

Antony

Chef-lieu de département

Chef-lieu d’arrondissement

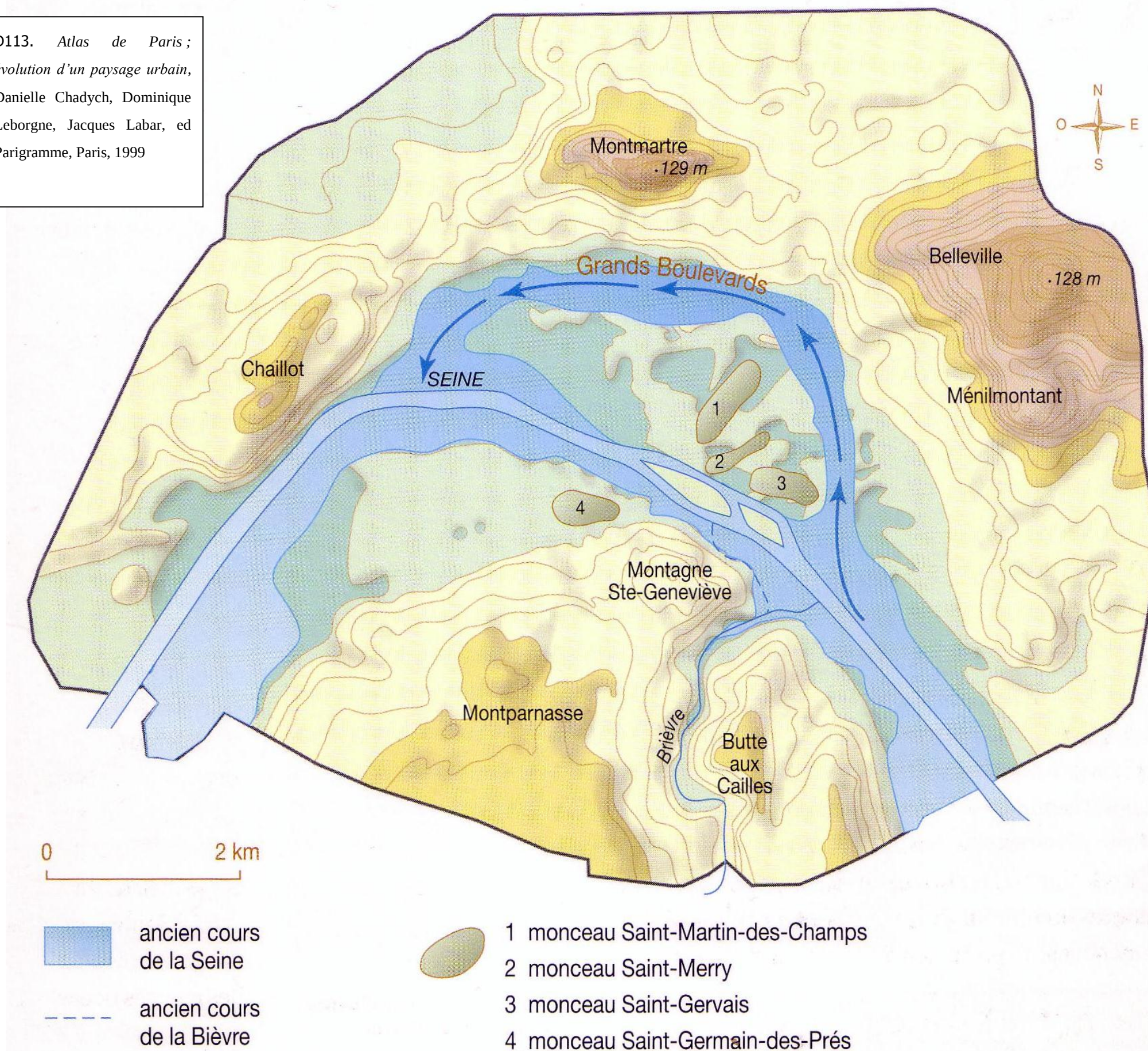
Siège administratif en zone urbaine

D112. Sources : *Atlas Nathan*, direction Jacques Charlier, Nathan, Paris, 2006

Défis et opportunités du développement durable / BdF / 20/04/2011

49 / 73

D113. *Atlas de Paris ;
évolution d'un paysage urbain,*
Danielle Chadych, Dominique
Leborgne, Jacques Labar, ed
Parigramme, Paris, 1999



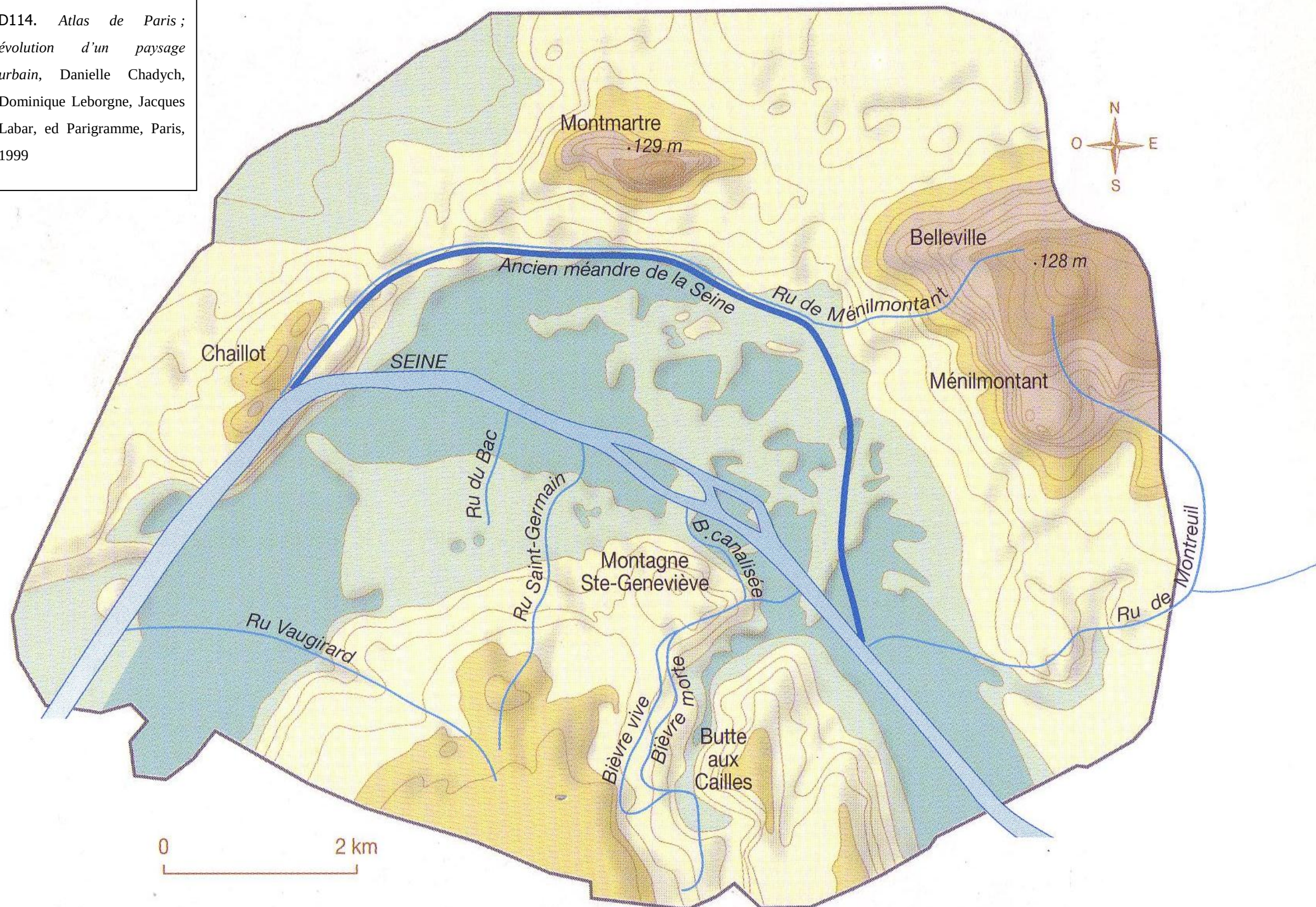
► Restitution de la Seine à l'époque préhistorique.

Le fleuve décrit une large courbe placée entre le confluent Seine-Marne à l'est et le méandre de Saint-Denis à l'ouest.

Amorcé par la déformation tectonique, le creusement de l'ancêtre de la Seine, lié aux changements climatiques, se poursuit par saccades. Suivant ces mouvements, le fleuve abandonna ses alluvions qui encombrèrent la vallée désormais perchée.

Alors que la surface alluviale récente était régulièrement recouverte par les grandes crues, le sol alluvial ancien – une plate-forme de gravier située à 7 mètres au-dessus de l'étiage – demeurait insubmersible.

Aujourd'hui on ne distingue plus le support alluvial récent de l'ancien. Cependant, on peut restituer quatre éminences insubmersibles sur lesquelles l'habitat s'est développé en priorité. Un fragment de la plate-forme insubmersible porte par exemple l'abbaye Saint-Germain-des-Prés.



» Restitution du réseau

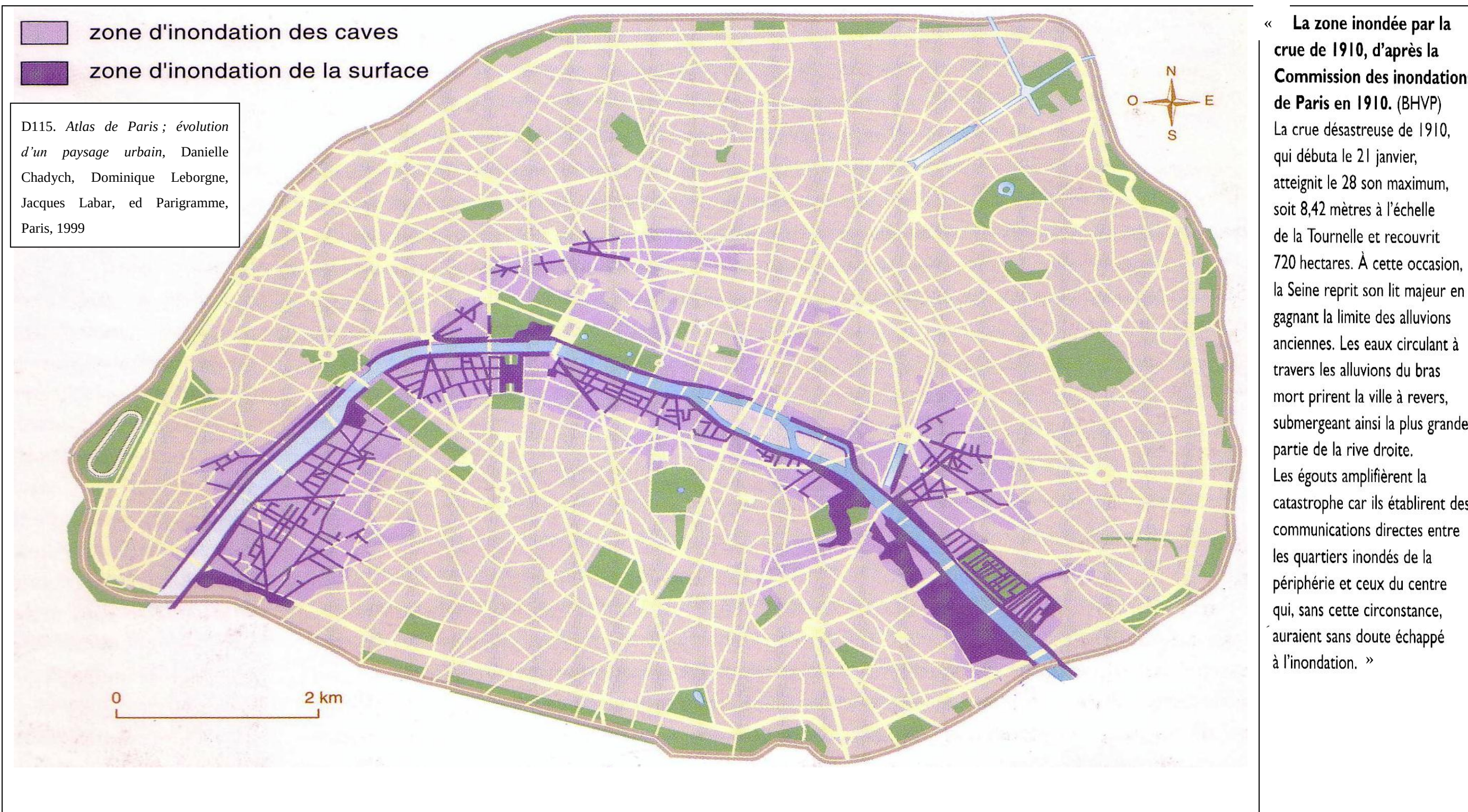
hydrographique parisien avant le XIX^e siècle.

Sur la rive droite, les eaux de pluie s'écoulaient vers le ru de Ménilmontant : une rigole recueillait ces divers écoulements et suivait la dépression actuelle du coteau de Belleville par les rues des Rigoles, des Cascades, de la Mare, des Maronites, le boulevard de Belleville, puis rejoignait le bras mort de la Seine, près de la place de la République.

Transformé en égout à ciel ouvert, le ru maçonné en 1740 et appelé "grand égout de ceinture" se jetait dans la Seine, à la hauteur du n° 18 de l'avenue de New-York. Le ru de Ménilmontant fut remplacé au XIX^e siècle par un égout souterrain et sa vallée remblayée.

Le ru de Fécamp prenait sa source à l'angle des rues Le Bua et Pelleport, à 91 mètres d'altitude. Il franchissait le boulevard Davout, gagnait Vincennes où il rejoignait le ru de Montreuil. Il traversait le bois de Vincennes et, passant par la porte de Montempoivre, se jetait dans la Seine, à 200 mètres en amont du pont de Bercy.

Le ru de Saint-Germain prenait sa source en bas de Montrouge et, suivant la rue Gassendi, traversait le cimetière Montparnasse, descendait les rues Notre-Dame-des-Champs, Vavin, du Four et Mazarine jusqu'au quai de l'Institut ; le vallon de Vaugirard suivait les rues d'Alésia, de Vouillé, de la Convention ; le ru du Bac suivait le tracé de la rue du même nom.



Les trois cartes ci-dessus (*Restitution de la Seine à l'époque préhistorique*, *la Seine avant 1800* et *L'inondation de Paris en 1910*) montrent les anciens lits de la Seine et de la Bièvre, les rus se jetant dans le fleuve, les zones élevées (Montmartre, Belleville, Ménilmontant, la Butte aux Cailles, la Montagne Sainte Geneviève et Chaillot) et les zones inondables. Les terrains élevés sont des buttes-témoins, issues de l'ancien plateau calcaire. La rive convexe de l'ancien bras de la Seine est inondable, surtout la moitié ouest. Egalement, l'ouest du XVe arrondissement et l'est des XIIIe et Ve arrondissement parisiens sont fortement inondables. Le XVe arrondissement étant très dense, le nombre d'immeubles de logements vulnérables y est encore plus fort. Les caves, les rez-de-chaussée, le bas des parties communes, les réseaux de distribution à l'intérieur des bâtiments sont concernés. Le nouveau quartier général militaire, qui sera installé dans le quartier Ballard, est inondable. Les musées d'Orsay et du Louvres sont vulnérables, notamment toutes les collections stockées dans les caves. La gare d'Austerlitz et ses lignes ferroviaires parisiennes, la bibliothèque François Mitterrand et son nouveau quartier environnant sont fortement soumis aux aléas des crues de la Seine.

5. Le facteur de vulnérabilité humaine

Pour établir le facteur de croissance de la vulnérabilité humaine (symbolisé fN_p), il suffit de calculer le rapport entre la population soumise au risque d'inondation sur un territoire donné actuellement et celle de ce même territoire à une époque passée. Pour les exemples étudiés, il s'agit d'une comparaison entre le nombre d'habitants en Ile de France et à Londres, aujourd'hui et en 1800.

5.1 L'exemple francilien

Selon le schéma de l'INSEE ci-dessous, la population francilienne est passée de 600.000 habitants en 1801 à 11,8 millions environ aujourd'hui.

Nous avons donc le rapport suivant :

$$fN_p (\text{idf } 2009-1801) = 11,8 \text{ M.hab} / 0,6 \text{ M.hab} \approx 19,67$$

Nous avons donc un facteur de croissance de vulnérabilité humaine de 20 entre aujourd'hui et 1800 pour la région francilienne. Comme nous l'avons dit auparavant, même si les faubourgs parisiens étaient des zones habitées en 1800, l'essentiel de la densité était dans Paris intra-muros.

5.2 L'exemple londonien

En 1800, la population londonienne était 0,96 million de personnes¹. En 2001, la région métropolitaine de Londres comptait 13,9 millions d'habitants².

$$fN_p (\text{Londres } 2009-1801) = 13,9 \text{ M.hab} / 0,96 \text{ M.hab} \approx 14,47$$

Nous avons donc un facteur de croissance de vulnérabilité humaine de 14 entre aujourd'hui et 1800 pour la région londonienne. Même si les faubourgs de Londres – correspondant au Grand Londres (« Greater London ») d'aujourd'hui (ou encore à la première couronne parisienne) - étaient des zones habitées en 1800, l'essentiel de la densité était dans Londres (équivalent de Paris intra-

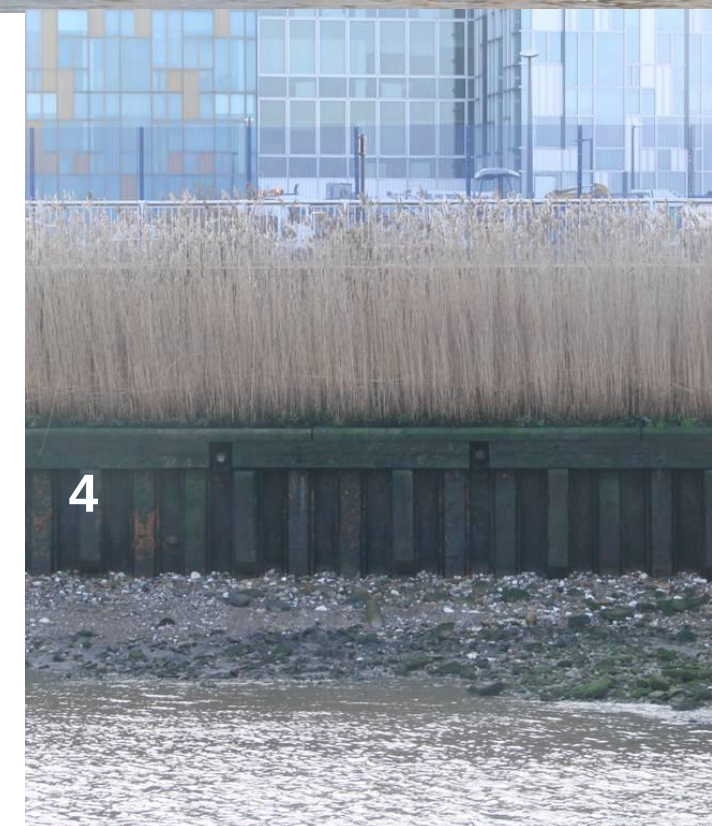
¹ *History of London*, wikipedia.org, Juil 2010. Egalement : www.ourwardfamily.com/victorian_london.htm, Juil 2010

² www.demographia.com/dm-lonarea.htm, juillet 2010.

muros). Aujourd'hui, la zone métropolitaine de Londres correspond à une « grande Ile de France ». Un territoire londonien plus grand mais avec une densité inférieure à la française.

5.3 Perspectives

Même si l'Ile-de-France est plus densément peuplée que la région métropolitaine de Londres, dans les deux mégalofoles, la vulnérabilité humaine a augmenté par des facteurs de 14 et 20. Toute implantation d'infrastructures urbaines accueillant du public sur le long terme (logement, écoles et universités, bureaux, usines) ou d'une façon temporaire (hall d'exposition) s'inscrit dans ce contexte de risques. Le développement pérenne de ces deux territoires exige de prendre en compte leurs caractéristiques hydrologiques, y compris leurs extrêmes n'ayant qu'une probabilité centennale, afin de prévenir d'une façon durable les catastrophes d'origine fluviale. Cette lutte prend deux formes : d'une part la prévention de l'aléa lui-même (l'inondation), d'autre part le développement de la résilience francilienne ou londonienne en limitant les conséquences dans le cas où cet aléa se réalise.

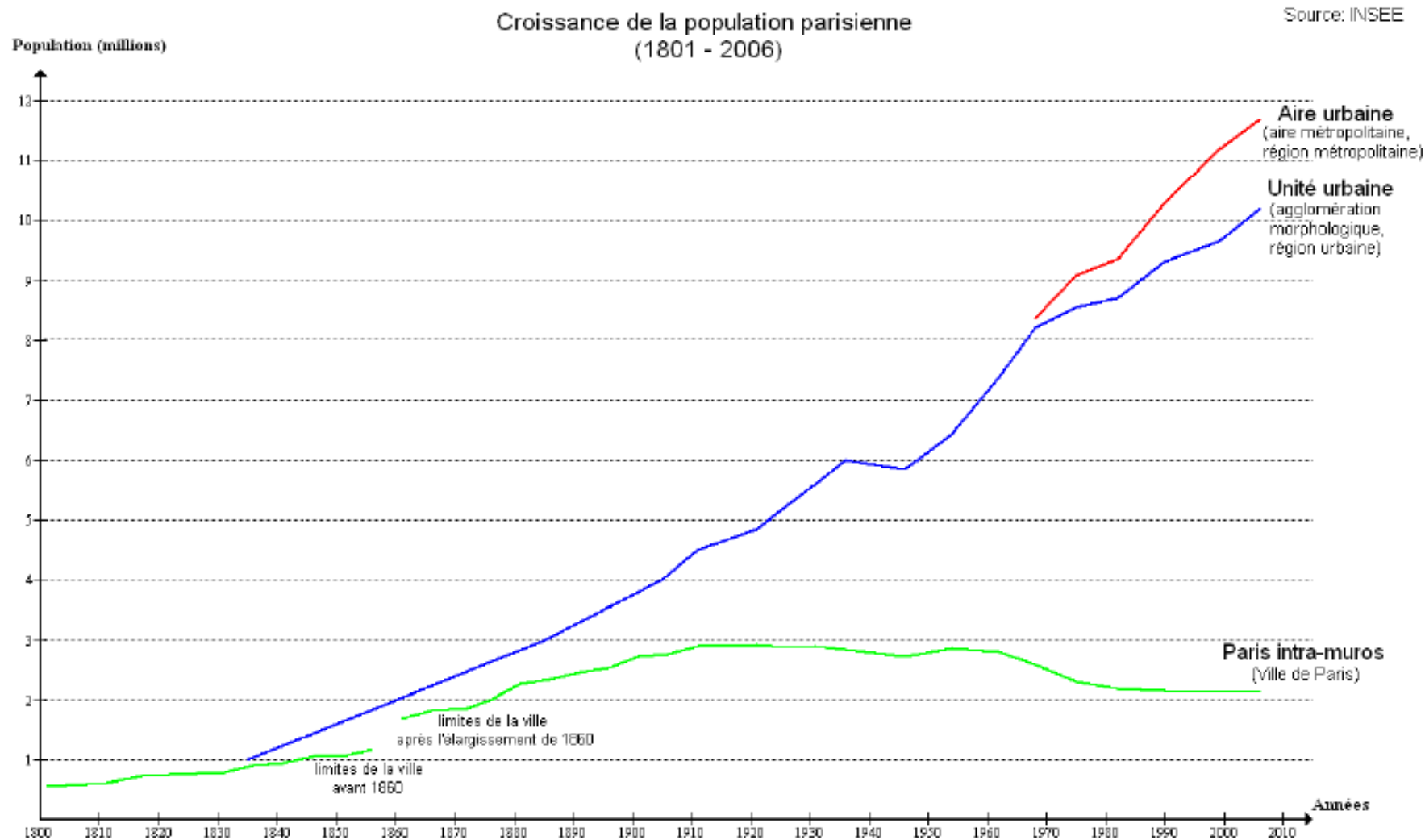


D116. Les photos 1, 2 et 3 (BdF, 06/02/2010) : la Tamise, à Greenwich. La hauteur de marnage peut atteindre 10 m. Ce fleuve est donc très sensible aux marées à cet endroit. Ce territoire est de plus en plus urbanisé, ce qui augmente sa vulnérabilité.

Photo 4 (BdF, 06/02/2010) : les « éternels » joncs afin de lutter contre l'eau qui menace d'envahir, surtout quand les marées sont fortes ou quand les pluies sont intenses ou...quand les deux événements se produisent.

Les photos ont été prises depuis une navette maritime de la « Transport For London » (TFL).

&



D117. Le schéma ci-dessus montre l'évolution de la population en Ile de France, entre 1800 et 2006, dans le centre historique (Paris intra-muros), dans les couronnes urbanisées et dans la sphère d'influence de la capitale française, aux confins de la périphérie, à la limite du monde rural. Les courbes bleue et rouge indiquent la croissance de la vulnérabilité humaine dans respectivement les zones péri-urbaines et urbaines. On note le transfert de population depuis Paris intra-muros vers la banlieue, à partir de 1960.

D118. Densités des territoires inclus dans l'Ile-de-France en 2007

Territoires	Population nombre d'habitants recensement 2007	Surface En km ²	Densité Hab/km ²
Paris intra-muros (département 75)	2.193.031	105	20.807
Petite Couronne (Depts. 92, 93, 94)	4.349.640	657	6.622
Grande Couronne (Depts. 77, 78, 91, 95)	5.056.173	11.250	449
Ile-de-France (région entière)	11.598.844	12.012	966
Bassin Parisien (géologique)	21.000.000	140.000	150

Si l'on enlève les superficies des bois de Boulogne et Vincennes, la densité de Paris intra-muros passe à environ 25.200 habitant (hab) par kilomètre carré, en 2007. Cette densité est parmi les plus fortes des différentes grandes capitales politiques ou économiques dans le monde.

Sources : INSEE, 2007, www.dechets-radioactifs.com (ed : Andra), www.cairn.info, juillet 2010. Modifications : BdF.

**D119. Densités des zones administratives
de la région du sud-est de l'Angleterre (2001)**

Territoires	Population Nombre d'habitants en 2001	Surface en km²	Densité hab/km²
Centre de Londres	2.766.000	305	9.054
Grand Londres	7.172.000	1.610	4.454
Aire Métropolitaine	13.945.000	16.256	858
Sud-est de l'Angleterre	18.387.000	27.473	669

**D120. Estimations historiques de la population et de sa densité
dans la zone urbaine de Londres**

Zone urbaine de Londres à une époque donnée	Population	Superficie en km²	Densité hab/km²
1680	450 000	10	43 436
1720	600 000	14	42 120
1770	700 000	18	38 610
1801	950 000	25	38 610
1821	1 350 000	39	34 749
1841	1 900 000	62	30 566
1901	5 000 000	285	17 550
1951	8 100 000	1 186	6 828
2001	8 279 000	1 624	5 098

Les estimations comprises entre 1720 et 1901 ont été faites à partir de plans de rues.

Sources : Office of National Statistics.

Plan des Cités de Londres et de Westminster, des “Borough” de Southwark, et de leurs alentours (1792 – 1799)

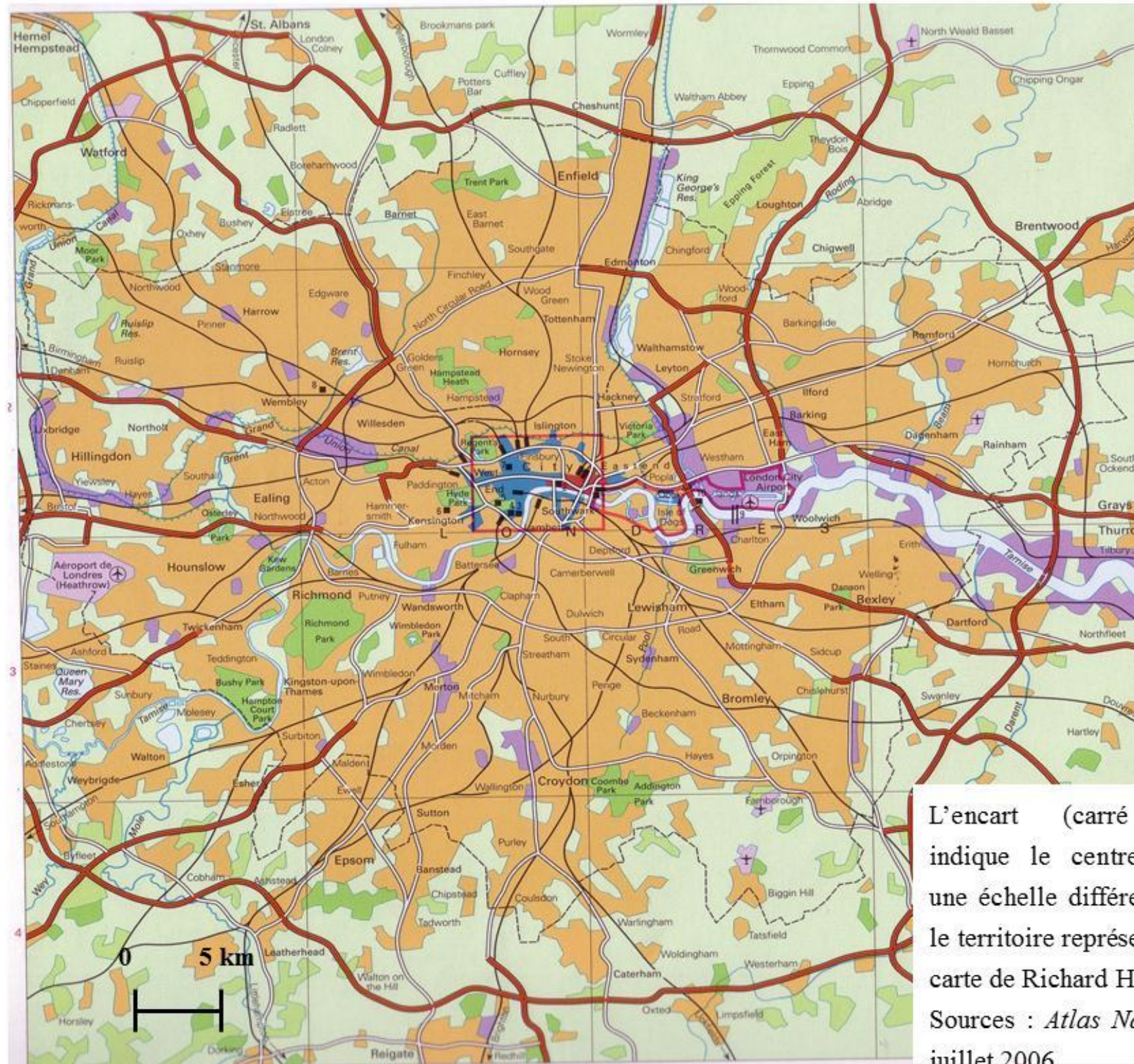
D121. Richard Horwood



A gauche, une carte de Londres, dessinée par John Rocque entre 1741 et 1745. Deux ponts existaient dans la deuxième partie de ce siècle : London Bridge et Westminster Bridge (construit en 1750). La carte ci-dessus montre à peu près la taille de la capitale britannique vers 1800. A l'ouest, la ville était délimitée par Mayfair, à l'est par les « London docks », au nord par l'actuel « borough » de Clerkenwell et au sud, la commune de Southwark. Bref, le Londres de 1800 avait sensiblement la taille du centre-ville actuel.

&

D122. Le Grand Londres actuel et son centre historique



- 1 Tower
- 2 St. Paul's Cathedral
- 3 Houses of Parliament
- 4 Westminster Abbey
- 5 Buckingham Palace
- 6 Albert Hall
- 7 British Museum
- 8 Wembley
- 9 Barrière de la Tamise
- 10 Millenium Dome

L'encart (carré rouge) indique le centre-ville. A une échelle différente, c'est le territoire représenté par la carte de Richard Horwood. Sources : *Atlas Nathan*, ed. juillet 2006.

&

6. Le facteur de vulnérabilité « totale »

Ce facteur, symbolisé « fVul », est le résultat du produit de la vulnérabilité matérielle et humaine.

$$fVul = fR_s \times f N_p$$

Ce facteur est analysé sous trois aspects : géographique, historique et urbanistique.

Toutes les zones urbaines à l'intérieur des régions londonienne et parisienne ne sont pas inondables. Dans Paris intra-muros, les collines de Chaillot, de Montmartre, de Belleville, de Ménilmontant, de la Butte aux Cailles, de la Montagne Sainte Geneviève, et enfin de Montparnasse, ne craignent certes pas les inondations ; non plus d'ailleurs que le mont Valérien et la terrasse de Saint-Germain-en-Laye pour la zone périphérique. A Londres, si les « Docklands » sont inondables, le « City » ne l'est pas. Mais il s'agit de calculer un ordre de grandeur de la croissance de la vulnérabilité humaine face aux inondations. Les berges ont de tout temps été habitées et furent souvent le lieu d'implantation d'industrie : facilité d'accès à l'eau (moyen de transport historique), faible dénivelé, jouissance d'un paysage beau et calme et de la fraîcheur en été.

Calculer un facteur de croissance de la vulnérabilité humaine face aux inondations sur une période de deux siècles peut sembler impertinent face à des besoins et des projets d'aménagement ayant besoin d'être construits immédiatement. Que l'on pense aux 150.000 logements manquants en Ile-de-France¹ ! Mais l'unité de temps pour l'aménagement est le demi-siècle : c'est le temps nécessaire entre la conception d'une technologie, sa fabrication à grande échelle, la constitution de son réseau éventuellement nécessaire, et le début de l'évaluation des résultats du projet exploité. L'automobile et le réseau routier, le béton artificiel et le logement social sont des exemples parmi d'autres.

L'urbanisation progresse de plus en plus vite, notamment grâce aux nouvelles techniques de crédit, de construction et de communication. Ce qui a nécessité plusieurs dizaines d'années

¹ « Pénurie de logements en Ile-de-France, à qui la faute ? », article paru dans *Le buzz immobilier*, Tonino SERAFINI, le 22/09/2005 ; « Bureaux contre logements : un antagonisme suicidaire pour la région Ile-de-France », article paru dans *Capital.fr/Blogs, Les clés de l'immobilier*, Jean-Michel Ciuch, Directeur général d'Immogroup Consulting, rédigé le 29 mars 2011

pour être construit peut l'être aujourd'hui plus rapidement, face à l'augmentation de la demande (75% des Français sont citadins aujourd'hui) et grâce aux moyens en ingénierie. A nouveau, l'analyse du long terme permet - peut-être - de mieux appréhender « l'accélération du temps ».

L'aménagement d'outils de régulation des cours d'eau permet de limiter les risques d'inondation, dans une certaine mesure. Cependant, plus on construit ces aménagements, plus les zones constructibles – c'est-à-dire peu ou pas inondables officiellement - sont étendues. Les berges de la Seine à Paris sont devenues constructibles, quitte à voir les caves de cette zone inondées. Celles situées à l'ouest de la capitale, dans les Yvelines, le sont devenues dans la deuxième moitié du XXe siècle, quitte à construire des immeubles (Chatou) dont les rez-de-chaussée sont...des garages, au lieu d'appartements comme pour les autres logements situés sur des terrains plus en hauteur; ou quitte à construire, comme dans les plaines de Montesson, des lotissements de villas urbaines sur des zones dédiées aux maraîchages depuis des siècles. Or, sur ces terrains maraîchers, la nappe phréatique peut remonter jusqu'au niveau du sol et provoquer des dégâts sur les zones urbanisées.

Les aménagements de la Seine permettent de lutter contre les inondations...quand les précipitations sont moyennes ou intenses. Par contre, si ces dernières sont exceptionnellement intenses, arrivent pendant l'hiver (faible évaporation), et se répartissent de telle sorte que les flux du bassin de la Seine en amont de Paris s'accumulent dans la capitale (au lieu de se répartir dans le temps), une crue centennale - de type 1910 – dépassera les capacités de rétentions des barrages, digues et réservoirs. Cela d'autant plus que les distances entre les barrages/réservoirs et Paris intra-muros sont longues : les précipitations tombées sur cette portion du bassin se sont pas stockées et iront gonfler les débits de la Seine à Paris. Si les grands Lacs de Seine avaient été construit avant 1910, ces derniers n'auraient pu diminuer le niveau de la Seine à Paris (8,62 m le 28 janvier 1910) que de 70 cm¹.

¹ Même si ces 70 cm ne représentent que peu de chose face à l'ampleur de l'inondation de 1910, ils auraient toutefois permis de diviser la facture finale par quatre. Sources : *Le jour où l'eau reviendra - 100 ans après la grande crue de 1910*, Pascal Popelin, ed Jean-Claude Gawsewitch, Paris, 2009, p 143.

D123. Le Bassin de la Seine, et ses barrages-réservoirs¹



Les réservoirs/barrages du bassin de la Seine sont¹ :

Panesière, sur l'Yonne, construit en 1949, avec une contenance maximum de 82 millions de mètres cubes (Mm³)

la Forêt d'orient (2), sur la Seine, construit en 1966, 205 Mm³

Der-Chantecoq (4), sur la Marne, construit en 1974, avec une capacité de 365 Mm³

le Lac Amance et le Lac du Temple, sur l'Aube, construits entre 1989 et 1990, avec une capacité cumulée de 175 Mm³

les Côtes de Champagne, sur l'Ornain (100Mm³), en projet

¹ Sources :

Le jour où l'eau reviendra - 100 ans après la grande crue de 1910, Pascal Popelin, ed Jean-Claude Gawsewitch, Paris 2009, p 103

L'Homme face aux crues et aux inondations, Jean-Noël Salomon, Presses universitaires de Bordeaux, 1997, p 76

Ces barrages ne sont pas uniquement destinés à écrêter les crues du bassin de la Seine en amont de Paris. En effet, les autorités locales et nationales attendent de ces aménagements plusieurs fonctions : soutien des flux lors des périodes d'étiage, irrigation des terres agricoles et activités touristiques (nautisme, pêche, promenade). Ces trois autres fonctions impliquent de garder ces lacs de rétention en partie remplis. Mais pour mieux prévenir une crue centennale, il faudrait vider ces réservoirs. Les conflits entre les usagers de l'eau jouent un rôle dans les politiques de lutte contre les inondations.

Nous avons une augmentation des équipements de sécurité - barrages-réservoirs, barrages-écluses, murettes, digues - qui est contrebalancée par une forte élévation des prises de risques, du fait de la spéculation immobilière ; les berges des cours d'eau sont en effet recherchées par les populations. Les aménagements fluviaux donnent un sentiment – trompeur – de sécurité. Cette tendance à la prise de risque diminue, sur le long terme, la résilience des bassins parisien et londonien face aux risques d'inondations majeures.

Il convient, dans un deuxième temps, d'introduire la vulnérabilité dans la formule de risque hydrologique ($f_{q_{\max}} \times V_{\max} \times f^*q = f_{\text{hydraulique}}$).

On peut considérer deux composantes de la vulnérabilité Vul : la population habitant sur la zone concernée par la crue et risquant d'être blessée ou tuée (N_p) et les richesses soumises à ce risque (R_e).

Si l'on multiplie le facteur de risque hydrologique à celui de l'augmentation de la vulnérabilité, on obtient le facteur de risque total, que nous appelons « facteur de risque fluvial » (F).

$$(f_{\text{hydrologique}}) \times (f_{\text{Vul}}) = F$$

ou

$$(f^*q_{\text{crue}} \times V_{\max} \times f^*Q) \times (fN_p \times fR_e) = F$$

Les sociétés d'assurances traduisent la vulnérabilité humaine en termes financiers. Selon la législation de chaque pays, tel décès équivaldra à telle indemnité et telle blessure corporelle ou psychologique à tel autre indemnité, selon les modèles utilisées par les compagnies aériennes. De ce point de vue, N_p peut être transformé en simple facteur de calcul de richesses et donc se transformer en R_e . Attention cependant : l'aménagement est une action

également politique – et pas uniquement financière – et la réalisation d'un aléa (crue) a des répercussions sur la manière de vivre, de penser et de s'organiser. Les responsables de l'aménagement – les élus – peuvent plutôt utiliser, pour évaluer la vulnérabilité, la formule initiale ($N_p \times R_e$). La partie humaine est l'axe du calcul de F, et tous les autres facteurs sont une aide à l'évaluation totale du facteur de risque fluvial.

Une crue pluviale arrivant sur un bassin versant à une époque où le débit est faible (par exemple, août pour la Seine à Paris et janvier pour l'Isère à Val d'Isère) fera augmenter fortement le débit fluvial par rapport aux débits faibles de la saison. L'intérêt de ce facteur réside dans le fait que les autorités locales – face à une demande, par exemple, d'autorisation d'un camping sur le lit majeur de la rivière en été dans les Alpes ou dans le bassin méditerranéen – pourront mieux appréhender le risque. Une crue pluviale, même en saison de faible débit, n'atteindra pas le niveau d'une crue, mais peut très bien atteindre le lit majeur - et rapidement - pour peu que le bassin versant (ou sa partie concernée) soit fortement minéralisé (montagne) ou urbanisé.

Pour les périodes de forts débits habituels, une « crue pluviale » pourra entraîner une « crue » ponctuelle c'est-à-dire un dépassement éphémère des hautes eaux habituelles. Si la pluie ponctuelle se répète ou dure – comme en 1910 – on ne parlera plus du tout de crue pluviale mais de « crue » et de fortes inondations. A Paris, si l'on multiplie le facteur de risque fluvial ($f_{\text{hydraulique}}$) par celui de la vulnérabilité ($N_p \times R_e$), on obtient la formule suivante :

Ile de France :

$$54 \times fN_p (\text{idf } 2009/1801) \times R_s (\text{idf } 2009/1801) = \\ 54 \times 19.67 \times 89 = 91.314 = 10^{4,97}$$

Londres (« London Metropolitan Area »)

$$54 \times fN_p (\text{Londres } 2001/1801) \times (\text{PIB}_{\text{Londres } 2009} / \text{PIB}_{\text{Londres } 1800}) = \\ 54 \times 14 \times 92 = 69.552 = 10^{4,72}$$

D124. **Composantes du risque fluvial**

	Facteurs (Risques/dates) Ile de France	1800	2001/09
	Aléa hydrologique f hydraulique	54	54
	Vulnérabilité humaine fN _p	1	19,67
Vulnérabilité matérielle R\$ $R\$ = \sqrt{(f_{urb} \times f_{PIB})}$	Croissance urbaine $\sqrt{(f_{urb})}$	1	88,27
	Croissance PIB $\sqrt{(f_{PIB})}$	1	88,75

	Aléa hydrologique f hydraulique	54	54
	Vulnérabilité humaine fN _p	1	14
Vulnérabilité matérielle R\$ $R\$ = \sqrt{(f_{urb} \times f_{PIB})}$	Croissance urbaine $\sqrt{(f_{urb})}$	1	53,3
	Croissance PIB $\sqrt{(f_{PIB})}$	1	91,43

Territoire	f hydrologique			fNp (2009)	$\sqrt{}$ (furb)	$\sqrt{}$ (fPIB)	F	Log F 10 ^x
	f ^q crue	V max	f ^Q					
Ile de France	3	3	6	19,67	9,40	9,42	94013	4,97
Londres	3	3	6	14	7,28	9,56	52626	4,72

Ces résultats montrent une croissance exponentielle de la vulnérabilité de ces deux zones urbaines. Que l'on soit en période de basses ou de fortes eaux, le facteur de risque fluvial global permet de calculer le risque global d'un aménagement à proximité du lit d'un cours d'eau. Ce facteur permet d'estimer – et donc de prévenir – les dommages humains et matériels potentiels, susceptible d'apparaître au fur et à mesure qu'un bassin versant (ou une partie) s'urbanise, notamment lorsque cette dernière se réalise à une vitesse exponentielle, c'est-à-dire dans le cadre d'une « accélération du temps ».

7. Conclusion

A Paris, l'inondation de 1910 a causé d'importants dégâts matériels, mais presque pas de victimes humaines. Le risque d'inondations en Ile de France est civil : il peut mettre en jeu une partie de son économie mais pas sa sécurité immédiate. Par contre, le risque d'inondation à Londres est d'ordre militaire : en cas de réalisation de l'aléa (que la raison soit d'origine météorologique et/ou anthropique), l'ampleur des dégâts serait telle que la sécurité de la région pourrait être mise en cause.

Les zones inondables à l'intérieur de l'Ile-de-France ou du Grand Londres s'inscrivent dans un tissu (péri)urbain et dans un fonctionnement systémique. Si une partie de cet ensemble est touché par une inondation, la totalité risque d'être affectée. La panne d'un nœud central dans un réseau ferré ou téléphonique peut gêner l'ensemble de ces réseaux. Si une crue atteint 6,20 m, la majeure partie du réseau RER souterrain sera envahie par l'eau.

Tout aménagement dans les bassins aval de Paris ou Londres s'inscrit dans un contexte de vulnérabilité. Au-delà de l'apparente sécurité des moyens de protection contre les risques d'inondation, placer un aménagement particulier ou une urbanisation régionale dans son contexte de croissance économique et démographique locale permet de mieux prendre en compte les vulnérabilités de ces territoires, tant sur le plan matériel qu'humain. Une meilleure compréhension des aléas et des risques facilite les choix pour augmenter la résilience des zones susceptibles d'être touchées directement ou indirectement par les crues. Ces vulnérabilités peuvent être calculées d'une façon globale (calcul de l'ensemble des dégâts risquant d'être provoqués par une crue centennale) ou d'une manière plus détaillée : analyse des seuls aléas « inondations » au fur et à mesure de l'urbanisation d'une zone, ou calcul des fragilités d'ordre uniquement matérielle ou uniquement humaine. Cette formule se place dans une dynamique d'interdisciplinarité, qui est une caractéristique majeure de l'aménagement du territoire. Elle prend en compte les aspects « naturels » (les aléas d'une crues), construits (urbanisme), financiers (PIB local), démographiques et psychologiques (préjudice moral) des territoires concernés.

Une réflexion de fond permettrait d'utiliser les outils actuels pour des projets viables sur le long terme. L'artificialisation des berges – et notamment leur bétonnage – fut probablement un travail d'ingénierie intéressant mais a déplacé le problème des inondations vers l'aval de ces ouvrages ; elle a quelque fois contribué à les aggraver en retenant l'eau, une fois la décrue

commencée. La solution traditionnelle de l'aménagement de zones d'inondations naturelles (cuvettes de débordement) ou artificielles (« plaines à casiers », champs d'épandage) permet de ralentir la crue et de la répartir dans les zones prévues. « Il vaut mieux chercher à étaler la crue que la contenir »⁴⁵.

⁴⁵ *L'Homme face aux crues et aux inondations*, J.N Salomon, Presses Universitaires de Bordeaux, 1997, p116