



HAL
open science

Chapitre 4: Risques et protection

Patrick Arnaud, Thomas Curt, Laurent Peyras, Remy Tourment, Olivier Bellier

► **To cite this version:**

Patrick Arnaud, Thomas Curt, Laurent Peyras, Remy Tourment, Olivier Bellier. Chapitre 4: Risques et protection. Guiot, J. (ed.); Mazurek, Hubert (ed.); Curt, T. (ed.); Raimbault, P. (ed.); Collange, L. (ed.); Thomas, S. (ed.). Marseille et l'environnement : bilan, qualité et enjeux : le développement durable d'une grande ville littorale face au changement climatique, Presses Universitaires de Provence, pp.65-98, 2021, Sciences Technologies Santé, 979-10-320-0293-3. 10.4000/books.pup.41408 . hal-03557427

HAL Id: hal-03557427

<https://hal.science/hal-03557427>

Submitted on 6 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sciences Technologies Santé

Marseille et l'environnement

Bilan, qualité et enjeux

Le développement durable d'une grande ville
littorale face au changement climatique

sous la direction de

Joël Guiot, Thomas Curt, Hubert Mazurek, Patrick Raimbault

2021

PRESSES UNIVERSITAIRES DE PROVENCE

Chapitre 4

Risques et protection

Patrick Arnaud, Thomas Curt, Laurent Peyras et Rémy Tourment

INRAE

Olivier Bellier

CEREGE

Quels sont les risques dans la région Aix-Marseille?

La région d'Aix-Marseille est fortement exposée aux risques naturels et technologiques du fait d'interactions fortes entre les facteurs humains et naturels. Les risques auxquels la population peut être soumise sont les revers de son attractivité humaine et paysagère, ainsi que de la forte concentration et du développement d'activités multiples et d'infrastructures (DREAL PACA).

La région d'Aix-Marseille est caractérisée par une forte concentration et une grande diversité des risques du fait du croisement :

- 1) de forts enjeux comme la densité croissante de sa population et l'afflux massif de touristes, le développement urbain et de réseaux et d'infrastructures ;
- 2) de conditions naturelles favorables aux aléas : un climat méditerranéen caractérisé par des extrêmes qui peuvent générer alternativement des crues ou des feux de forêt ; une forte sismicité ; des reliefs abrupts qui contribuent au ruissellement et à l'érosion des sols ; la proximité d'un grand fleuve (le Rhône) ; un grand linéaire de littoral (DREAL PACA).

En conséquence, la plupart des 1,5 million d'habitants des communes de l'aire urbaine Marseille / Aix-en-Provence (chiffres INSEE, 2014) sont soumis à un ou plusieurs risques.

Environ trois quarts des communes ont déjà fait l'objet d'un arrêté de catastrophe naturelle (DREAL PACA). La plupart des risques naturels majeurs recensés en France sont présents dans l'aire Aix-Marseille et tous les risques technologiques sont présents, à savoir :

Encadré 1 - Qu'est-ce que le risque?

Le risque est défini comme le produit d'un aléa qui peut survenir (par exemple, une crue ou un séisme) et de la vulnérabilité des enjeux qui peuvent y être soumis (par exemple, des personnes, des maisons, une route, etc.). La vulnérabilité des enjeux s'évalue en fonction des dommages qu'ils peuvent subir lors de l'événement.

Les risques naturels et technologiques majeurs font partie de notre quotidien même s'ils ne sont pas toujours perçus par le public, puisque ce sont des événements rares caractérisés par une forte gravité mais une faible probabilité. On cherche à évaluer si un risque est « acceptable » pour une population donnée, c'est-à-dire s'il sera toléré par la population concernée en toute connaissance de cause. Un graphique classique montre que le risque peut être acceptable pour un aléa fort mais une vulnérabilité faible, ou pour un aléa faible et une vulnérabilité forte. Afin de réduire les risques, les démarches peuvent donc viser à réduire, à mieux prévoir, qualifier, quantifier l'aléa (où? quand? avec quelle intensité?), mais aussi à réduire la vulnérabilité des enjeux (comment rendre ma maison moins vulnérable?). La meilleure stratégie consiste à travailler sur les enjeux. Il est d'abord crucial d'éviter d'installer des personnes, des habitations ou des infrastructures dans des zones fortement exposées aux aléas. Par définition, le risque est l'affaire de tous: l'État qui réglemente pour les réduire et qui informe, les départements qui organisent les secours, les communes qui peuvent prendre des arrêtés locaux, et les particuliers qui peuvent réduire leur propre vulnérabilité par une gestion active de leur propriété.

- des risques naturels: inondations, incendies de forêt, mouvements de terrain, risque sismique;
- des risques technologiques industriels: équipements sous pression, canalisations, réseaux, installations classées, risque nucléaire, risques liés aux transports de matières dangereuses et risques miniers;
- des risques sur les ouvrages hydrauliques: rupture de digues ou barrages;
- des risques pour la santé et l'environnement: risques sanitaires, substances chimiques, déchets, qualité de l'air, qualité de l'eau.

La plupart de ces risques sont accidentels et souvent (heureusement) rares, mais certains peuvent être chroniques comme ceux liés à la pollution de l'air. Les prédictions sur les changements climatiques et sur les dynamiques urbaines font l'hypothèse que la plupart de ces risques vont s'accroître dans les prochaines décennies. Dans ce contexte, l'objectif des politiques publiques régionales est de maintenir un cadre de vie, des activités et une qualité de vie



Figure 1. La Nartuby à Trans-en-Provence le 16 juin 2010. (Crédits : Philippe Cantet.)

attractifs et durables en orientant les politiques d'activités et de développement d'infrastructures ainsi que les politiques urbaines et environnementales de manière à limiter l'exposition des enjeux humains, économiques et technologiques aux risques, aux nuisances et aux pollutions.

Les risques hydrométéorologiques

L'état des lieux

L'eau est une ressource indispensable au développement d'un territoire (pour l'agriculture, la consommation, l'industrie ou les loisirs), mais peut aussi être la source de menaces à travers les risques d'inondation ou de sécheresse. La gestion de l'eau est donc un enjeu fort pour un territoire, nécessitant de préserver cette ressource et de s'en préserver.

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est particulièrement concernée par cette gestion de l'eau pour deux raisons essentielles. La première est liée à sa proximité de la mer Méditerranée qui génère un climat à l'origine des phénomènes climatiques extrêmes du territoire métropolitain français. On parle alors d'un aléa climatique fort. Ces phénomènes concernent d'une part les précipitations violentes des mois d'automne et de printemps favorisant les inondations et les glissements de terrain; et d'autre part les périodes de sécheresse estivale marquée, parfois accentuée par des vents forts, occasionnant une pénurie dans la ressource en eau en plus des risques d'incendie. La seconde raison est la forte urbanisation de la région, particulièrement la zone côtière, qui augmente l'exposition des populations aux risques hydrométéorologiques, mais qui peut aussi créer des tensions sur la demande en eau. On parle alors de la vulnérabilité du territoire.

C'est donc le croisement d'un aléa fort et d'une vulnérabilité forte, tous deux présents sur le territoire, qui conduit à ce risque particulièrement élevé en région Provence-Alpes-Côte d'Azur et précisément sur une métropole telle que Aix-Marseille Provence, où se concentrent ces enjeux liés à la densité de population élevée et à une forte activité industrielle et touristique.

Parmi les risques hydrométéorologiques liés aux conditions climatiques particulières de la région méditerranéenne, les principaux sont les crues et les inondations qui en résultent. Situées au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde, les inondations causent en moyenne 20 000 victimes par an. Sur le territoire français parcouru par 160 000 km de cours d'eau, c'est une surface de 22 000 km² qui est reconnue particulièrement inondable, répartie sur 7 600 communes et touchant deux millions de riverains (MTES, 2020¹). Les crues occasionnent ainsi près de 80 % des dommages associés aux aléas naturels et la région PACA n'est pas épargnée (figure 1 *supra*).

Certaines crues concernent de grands fleuves de la région (Rhône, Durance, Var). Si le phénomène est lent et relativement prévisible, il n'en demeure pas moins dévastateur (les crues du Rhône en 2003 ont causé plus d'un milliard d'euros de dégâts; rupture des digues de Camargue en 1994 et 2003).

1 Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020) Prévention des inondations, <http://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-inondations>.

Les crues « éclairs » touchent les petits bassins versants particulièrement soumis à des pluies intenses (bassins côtiers fortement urbanisés – Huveaune à Marseille, les Vallas secs à Marseille, etc.). L'anticipation de ces phénomènes est presque impossible à cause du faible temps de réaction des bassins et de la difficulté d'instrumenter tous les petits cours d'eau.

Les inondations par ruissellement urbain peuvent aussi provoquer de nombreux dégâts avec la saturation du réseau d'assainissement et la coupure de routes (Marseille 2002-2003, Aix-en-Provence 1993, etc.).

Ces crues, fréquentes dans la région, provoquent des dégâts importants et posent des problèmes pour la sécurité de personnes. Elles génèrent des vitesses d'eau importantes dans une région au relief marqué et sont difficiles à prévoir du fait de leur rapidité et de leur forte variabilité spatiale.

L'autre risque lié aux conditions climatiques typiques de la région méditerranéenne concerne la ressource en eau. Si la ressource en eau est globalement abondante en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, elle reste inégale dans le temps et dans l'espace. La région marseillaise est la plus faiblement arrosée par les précipitations en PACA et les températures élevées en période estivale induisent une forte perte par évaporation. La région marseillaise puise sa ressource en eau en grande partie de l'eau de la Durance (60 % de la ressource en eau de la région) et du Verdon grâce à la mise en place d'un réseau de distribution et d'alimentation en eau potable performant (Canal de Marseille, Société du Canal de Provence).

C'est une particularité de la région PACA qui, malgré un étiage marqué de ses cours d'eau côtiers (parfois secs en été), bénéficie d'une ressource en eau assurée par les apports des cours d'eau à régime nival et par la présence d'aménagements hydrauliques importants (barrages du Verdon, canaux de la Durance et du Verdon). Cette ressource peut cependant être compromise par une succession d'années sèches ou des hivers présentant une faible pluviométrie sous forme neigeuse rendant le remplissage des retenues parfois problématique.

La gestion du risque

Il existe de nombreux outils mis à disposition des gestionnaires pour répondre à la question de la gestion des risques d'inondations: les Atlas de zones inondables (AZI), les Plans de prévention des risques inondation (PPRI) et plus récemment les Plans d'action et de prévention des inondations (PAPI) ou pour la gestion de la ressource (loi sur l'eau de 1992). Dans le cadre de la Directive inondation (2007), l'agglomération de Marseille (tout comme les communes d'Aix-en-Provence ou Salon-de-Provence) a d'ailleurs été recensée comme un des 122 Territoires à risque important d'inondation (TRI) français sur lequel une cartographie des zones inondables a été réalisée.

En parallèle de la prévention, qui se situe en amont dans la chaîne de gestion des risques, les outils de prévision visent à alerter les populations sur l'apparition d'une situation à risque afin d'en limiter l'impact. Basés sur

l'utilisation de nouvelles observations des précipitations (les radars météorologiques) et sur la mise en œuvre de modélisations hydrologiques, des outils permettent de prévoir les phénomènes et de proposer une information pour l'alerte et la gestion en période de crues. Ces outils sont alors mis en place pour aider les gestionnaires en période de crise. Le territoire d'Aix-Marseille Provence bénéficie bien sûr de tels outils, comme les cartes de vigilance sur l'Huveaune (Vigicrue), l'accès au service d'Avertissement aux pluies intenses à l'échelle des communes (APIC) ou les informations fournies par la plate-forme RHYTMME (Risques hydrométéorologiques en territoires de montagnes et méditerranéens) qui est un bel exemple d'outil d'aide à la gestion des risques hydrométéorologiques (figure 2).

La ville de Marseille et la métropole Aix-Marseille Provence font aussi partie des collectivités ayant mis en place un dispositif de surveillance et de mise en alerte. La SERAM (Société d'exploitation du réseau d'assainissement de Marseille) participe aussi à la gestion du réseau d'assainissement en temps de crues.

Les acteurs mobilisés pour gérer la crise sont nombreux dans la métropole : le service de prévision des crues Med-Est basé à Aix-en-Provence, la DREAL, la région, les services des Eaux de Marseille ou la société du Canal de Provence pour l'alimentation en eau, les Services de secours (SDIS), etc. Autant d'acteurs mobilisés pour gérer au mieux les risques hydrométéorologiques et proposer des solutions pour une gestion durable du territoire face aux problèmes liés à l'eau.

Prospective

Si le changement climatique est avéré, l'évolution des valeurs extrêmes est plus difficile à observer et à prévoir. Selon le rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat sur le climat de la France au XXI^e siècle, les projections montrent une tendance peu significative à l'augmentation des précipitations extrêmes en France méditerranéenne et une tendance à l'augmentation des périodes de sécheresse estivale. Cependant, les tendances au réchauffement sont très significatives et devraient contribuer à l'augmentation de l'évaporation et à une modification du processus de fonte nivale pouvant être décalée dans le temps.

Ces évolutions peuvent influencer la durée de la saison sèche, la gestion des retenues d'eau de la Durance et du Verdon, et avoir un impact sur l'alimentation en eau de la région de Marseille (ou des Bouches-du-Rhône) qui est en grande partie due à l'apport de la fonte nivale.

Indépendamment ou pas du changement climatique, l'évolution de l'occupation du sol peut provoquer une évolution forte des risques hydrométéorologiques. Deux facteurs sont à l'origine de cette évolution des risques :

- la modification du cycle de l'eau : augmentation des phénomènes de ruissellement avec augmentation des débits et des vitesses, réduction de la recharge des nappes avec la réduction de l'infiltration, impact de la

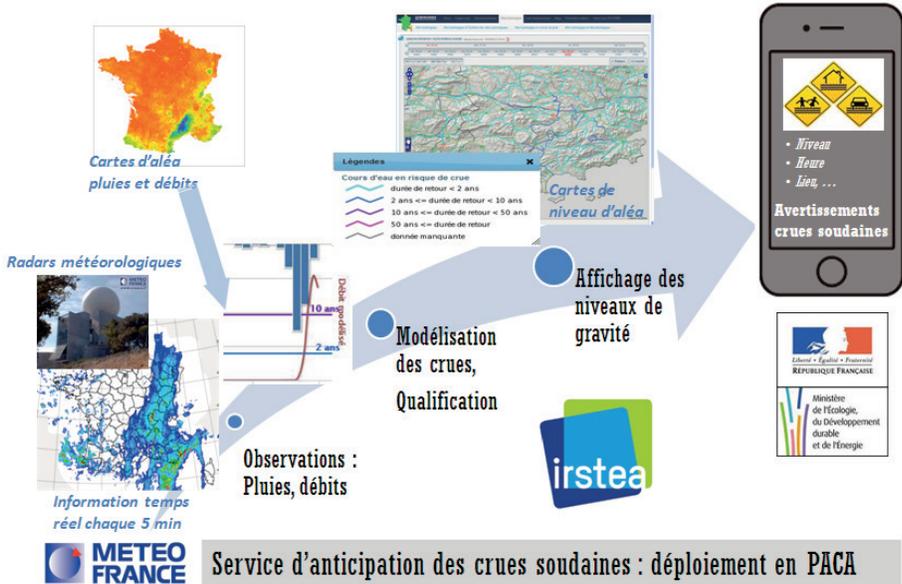


Figure 2. Principe d'un service d'anticipation des crues soudaines déployé en région PACA - Projet RHYTME.

- couverture végétale sur l'évapotranspiration, l'interception, etc. Dans la région d'Aix-Marseille Provence, ces phénomènes peuvent être dus aux grands incendies, à l'imperméabilisation croissante des sols à la suite de l'expansion des zones urbaines et à la déforestation au profit d'activités anthropiques (culture, viticulture, fermes solaires, zones industrielles, etc.);
- l'augmentation de la vulnérabilité des territoires avec une densification des zones urbanisées et la surprotection de biens pouvant faire oublier le risque. La constante expansion d'Aix-Marseille Provence ne fait qu'augmenter cette vulnérabilité.

Notons que l'évolution de l'occupation du sol et l'augmentation de la vulnérabilité peuvent avoir un impact sur les risques plus préjudiciable à court terme que celui du changement climatique. On peut alors se poser la question de l'acceptation du risque et à quel niveau.

Ces modifications des régimes hydrologiques auront sûrement aussi un impact sur les écosystèmes aquatiques et la gestion de la ressource en eau.

Pour l'avenir, les enjeux sont donc la sécurité des personnes (prévention mais aussi prévision et alerte), la sécurité des ressources (qualité et quantité, évolution de l'agriculture, etc.), la prise en compte de l'évolution climatique et de l'occupation du sol dans le dimensionnement des infrastructures et l'aménagement du territoire. Cette sécurité sera en grande partie réalisée par une meilleure

connaissance des phénomènes mis en jeu et qui sont par nature difficilement contrôlables et par une réduction de notre vulnérabilité. Sur un territoire autant soumis aux aléas hydroclimatiques que la région d'Aix-Marseille et présentant autant d'enjeux économiques et sociaux, une attention particulière est nécessaire pour proposer des règles d'usages de l'eau et d'aménagement du territoire qui garantissent des solutions durables face à la gestion de l'eau et des risques associés. C'est un des défis auxquels doivent répondre les chercheurs, les gestionnaires, les décideurs et les usagers de ce territoire.

Les risques d'incendies de forêt

État des lieux

L'aire Aix-Marseille fait partie des « points chauds » d'activité des incendies de forêt et de milieux naturels (prairies, garrigues, landes, etc.) en France et en Europe (figure 3). Trois quarts des communes de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur ont connu au moins un incendie depuis 1973. En moyenne, on compte 4 000 départs de feux par an et 24 000 ha de forêts et de milieux naturels brûlés par an. Les incendies menacent les populations, les habitations, les infrastructures et les réseaux, générant ainsi un coût humain et économique important. Cette région est favorable aux incendies car elle regroupe plusieurs facteurs prédisposant à leur démarrage puis à leur propagation : un climat caractérisé par une longue saison de sécheresse et un vent fort, une végétation abondante et souvent inflammable et une forte pression anthropique (densité humaine, densité de l'habitat, des réseaux routiers, des infrastructures) qui génère un nombre important de départs de feux. Elle comprend aussi une forte concentration des enjeux humains et technologiques. Le fort risque incendie dans l'aire Aix-Marseille résulte donc du croisement d'un fort aléa et d'une forte vulnérabilité des enjeux humains, économiques et écologiques.

Les causes de ces incendies sont connues grâce à la base de données Prométhée qui recense tous les incendies de forêt et de milieux naturels dans les quinze départements du sud-est de la France depuis 1973². La plupart des départs de feux sont causés par l'homme, la part des incendies d'origine naturelle (foudre) étant de 5 %. La part des ignitions volontaires est importante car la pression humaine est particulièrement forte en été. Les départs des feux sont souvent accidentels (c'est-à-dire causés par les infrastructures comme les décharges publiques ou les voies ferrées, ou par l'homme à proximité de ces infrastructures), mais aussi allumés de manière involontaire par les personnes privées : brûlage de végétaux, barbecues, etc. Ces causes sont particulièrement fréquentes dans la région car la concentration humaine (tourisme estival) et l'habitat permanent sont particulièrement denses, notamment à proximité des forêts et des espaces naturels dans les zones dites d'interfaces habitat-forêt

² <http://www.promethee.com>.

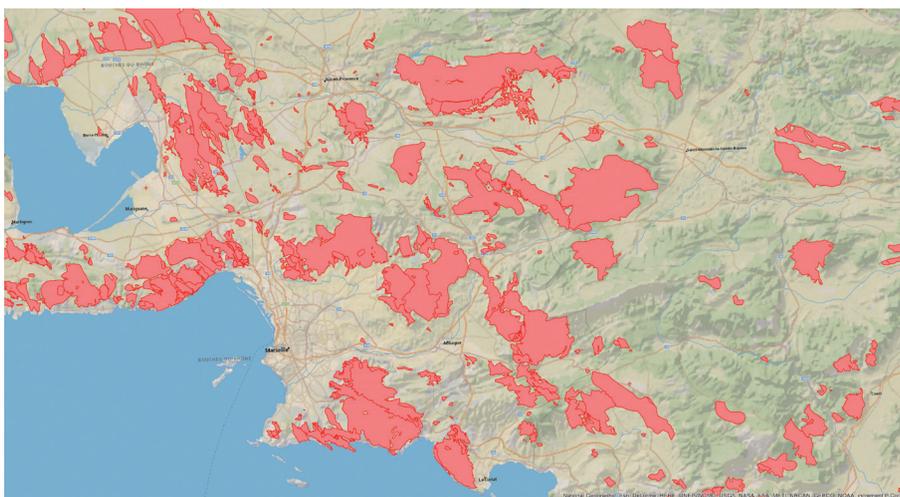


Figure 3. Carte des grands incendies dans l'aire Aix-Marseille depuis 1960. (Source : ONF / IRSTEA.)

ou rural-forêt. La connaissance des causes et de leur localisation permet de focaliser la prévention des incendies et la surveillance par les pompiers. Les interdictions de circulation en forêt (en été et pendant les périodes à risque) et du brûlage de végétaux (même en saison moins sèche) semblent donc justifiées pour l'aire Aix-Marseille au vu des causes spécifiques locales.

Les zones brûlées sont situées dans des végétations très inflammables et combustibles (garrigues, pelouses, forêts de pins, etc.) ou dans lesquelles l'homme met le feu volontairement (pour éliminer les résidus d'exploitation ou pour diminuer la biomasse) ou accidentellement. La répétition des incendies favorise le développement de végétations inflammables comme les garrigues et les pelouses. Inversement, certains types d'occupation du sol ou de végétation sont très peu inflammables et combustibles (oliveraies, vignes, zones cultivées et fortement pâturées, etc.) et donc rarement incendiées. Ils peuvent même être très efficaces pour limiter les départs de feu ou créer des coupures de combustible qui ralentissent ou stoppent la propagation du feu.

Il existe une saisonnalité des incendies : la plupart surviennent en été car les conditions météorologiques sont très favorables et les activités humaines et touristiques sont au maximum. Cela est vrai pour l'ensemble de l'aire Aix-Marseille. Cependant, des pics d'activité peuvent aussi exister de l'automne au printemps, liés aux activités agricoles, pastorales ou forestières dans les secteurs les plus ruraux, mais aussi dans les zones de contact entre l'urbanisation et les milieux naturels (les interfaces habitat-forêt), qui se développent rapidement.

L'organisation spatiale du paysage dans l'aire Aix-Marseille influe sur la localisation du risque incendie. En effet, les départs de feux surviennent préférentiellement à proximité des habitations, des infrastructures (usines, routes, lignes

électriques, voies ferrées, etc.) et des zones d'activité agricole ou pastorale. La localisation des grandes zones de végétation combustible influe ensuite sur la propagation de celui-ci et sur l'extension des zones brûlées. La combinaison de ces deux facteurs crée à la fois les zones de fort aléa et de fort risque, là où les incendies sont fréquents et intenses et où existent de forts enjeux.

La plupart sont très petits (95 % des incendies parcourent moins de 7 ha dans les Bouches-du-Rhône). Cette taille réduite est notamment liée à l'efficacité de la politique de prévention et des forces de lutte. Cependant, les quelques grands incendies qui surviennent constituent la plus grande part du risque: 1,3 % des incendies ont une surface supérieure à 100 ha, et ils brûlent au total 83 % des surfaces brûlées du département. L'impact humain, économique, écologique et médiatique de ces grands incendies est très important.

La mise en place d'une politique renforcée associant la prévention et la lutte depuis 1993 a clairement permis de réduire le nombre et surtout la taille des feux par rapport à la période précédente. Cet effet de la politique a peut-être été renforcé par de meilleures conditions météorologiques (étés moins secs et moins ventés) au cours de la même période. Pourtant, l'efficacité même de cette politique peut faire craindre l'augmentation des grands incendies à plus long terme du fait de la réduction des surfaces brûlées qui a permis l'augmentation de la biomasse combustible. Par ailleurs, l'augmentation avérée des températures et l'extension probable de la période à fort risque météo pourraient conduire au développement de ces grands feux problématiques.

La gestion du risque

Les acteurs de la prévention et de la gestion du risque incendie sont nombreux dans l'aire Aix-Marseille: sécurité civile et préfecture, DREAL, sapeurs-pompiers, services du conseil général et des métropoles. L'aléa est bien connu et son estimation est facilement accessible aux décideurs publics, aux gestionnaires et aux particuliers (voir liens ci-dessous, source DREAL PACA). Un suivi des procédures «risques» est réalisé au sein de la base de données nationale GASPARE (Gestion assistée des procédures administratives relatives aux risques), essentiellement consacrée aux risques naturels, dont les résultats sont présentés sur le site Internet «Portail de la prévention des risques majeurs³». Les PPR technologiques sont gérés au niveau de l'application d'une base de données nationale GIDIC (Gestion informatisée des installations classées). Le portail CARTORISQUE a vocation à regrouper l'ensemble des cartes des risques naturels et technologiques majeurs⁴.

3 <http://www.prim.net>.

4 <http://cartorisque.prim.net>.



Figure 4. Après l'incendie de Rognac (août 2016). (Crédits : Fabien Guerra, IRSTEA, Aix-en-Provence.)

La prospective : risque incendie et développement durable dans l'aire Aix-Marseille

Une politique durable pour les risques doit s'appuyer sur la prise en compte de l'évolution de l'aléa et des enjeux menacés à moyen terme. En effet, la probabilité de développement d'un incendie évolue assez rapidement avec le climat et ses changements, l'occupation du sol, l'organisation du paysage et la politique de prévention et de lutte.

Plusieurs questions importantes se posent en matière de risque incendie et de développement durable dans l'aire Aix-Marseille.

Les changements climatiques en cours augmentent la probabilité des incendies et leur intensité, ils allongent la période à risque et, sur le long terme (quelques décennies), ils favorisent l'accroissement de la biomasse combustible et les dépérissements forestiers qui produisent du combustible mort.

Les décideurs publics et les acteurs de la lutte devront aussi faire face à une augmentation des incendies particulièrement dévastateurs liés à des événements climatiques exceptionnels comme celui de 2003 et de 2016, tels que les grands incendies des Maures (Var) ou l'incendie de Rognac-Vitrolles pendant l'été 2016, qui a menacé la périphérie nord de Marseille, détruit vingt maisons et un lycée ainsi que paralysé la circulation routière et aérienne (figure 4).

Depuis plusieurs décennies, l'augmentation des constructions à proximité des forêts et des milieux naturels combustibles développe des zones « d'interfaces habitat-forêt » qui génèrent des départs de feux, mettent en danger les

Encadré 2 - La recherche-action sur les incendies en région Aix-Marseille pour une politique durable

Les recherches régionales visent à adapter les territoires au risque incendie :

- en matière de prévention du risque incendie, à mieux évaluer l'aléa météo par un suivi de l'état hydrique du combustible, à détecter les impacts des changements climatiques sur le risque incendie et sur les écosystèmes, à caractériser la végétation combustible (notamment par l'utilisation de capteurs LIDAR), à modéliser l'aléa d'éclosion, et à mieux cartographier les enjeux (notamment des zones d'interface habitat-forêt [figure 5]);
- en matière de risque, à améliorer la connaissance sur les événements passés pour mieux prédire le risque, à évaluer la vulnérabilité des écosystèmes et des enjeux naturels et anthropiques, des bâtis et des réseaux en croisant les cartes d'aléa avec les cartes d'enjeux et à modéliser le risque futur;
- en matière de lutte, à améliorer les techniques de lutte et à évaluer l'efficacité-coût de la lutte.

Ces données ont notamment été utilisées pour appuyer des décisions publiques (CESER PACA: mission changement climatique) et pour l'établissement de plans de prévention des risques incendie de forêt (PPRif des Bouches-du-Rhône, plans départementaux de DFCI et plans de massifs: exemple du plan de massif des Calanques¹).

1 <http://www.calanques-parcnational.fr/fr/des-actions/proteger-et-preserver/plan-massif>.

biens et les personnes, et compliquent l'action des pompiers lors d'incendies. Le développement des maisons, des réseaux et infrastructures dans l'aire Aix-Marseille augmente fortement le risque puisqu'il accroît la présence de personnes et de biens à proximité des zones dangereuses.

Bien qu'il existe encore des incertitudes liées aux modèles climatiques et aux scénarios socio-économiques, l'augmentation conjointe de l'aléa météorologique et des enjeux exposés (maisons, routes, infrastructures critiques) conduit à une augmentation du risque.

Face à ces évolutions, la prévention et la gestion durable du territoire sont les éléments essentiels pour réduire le risque incendie et ses impacts sur le long terme dans l'aire Aix-Marseille. Les documents permettant de connaître le risque existent et sont régulièrement améliorés. Les principales pistes (cf. CESER PACA 2016, PNACC2) sont une gestion forestière durable visant à diminuer la biomasse, favoriser des essences adaptées, maîtriser l'urbanisation

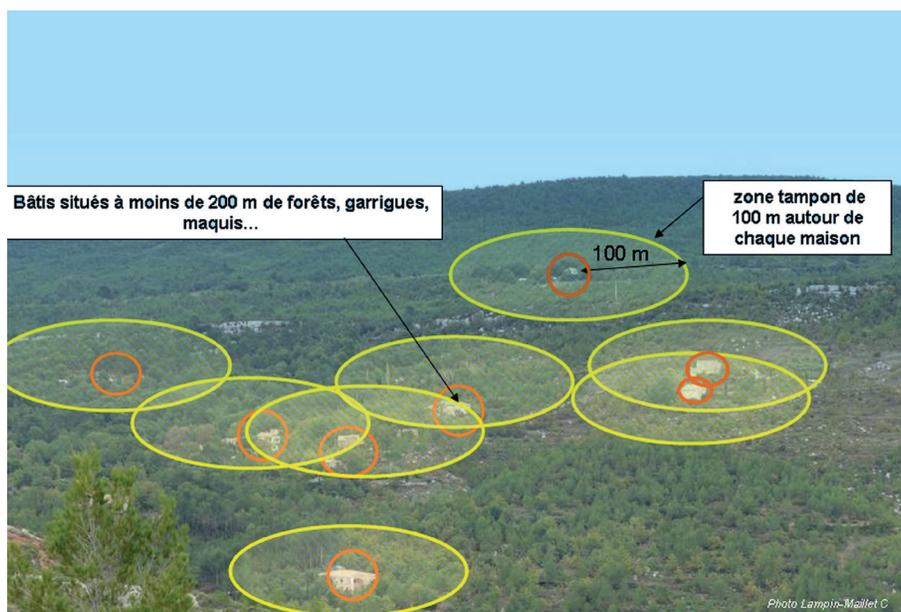


Figure 5. Cartographie des zones d'interfaces habitat-forêt. (Source : Lampin *et al.*, 2010.)

et responsabiliser les acteurs privés (débroussaillage et autoprotection, alerte précoce), favoriser le sylvopastoralisme, le brûlage dirigé et l'agriculture pour entretenir des coupures de combustible au sein des paysages.

Si le risque incendie est globalement fort dans l'aire Aix-Marseille, il faut garder en tête que le feu y est depuis des millénaires un outil utilisé par l'homme pour gérer la végétation ainsi qu'une perturbation courante pour la plupart des écosystèmes. Cette perturbation est même nécessaire au maintien de la biodiversité et de certaines espèces dans quelques écosystèmes « contrôlés par le feu ». Une conséquence majeure de ce constat est qu'il est donc peu vraisemblable (et pas forcément souhaitable) d'« extirper » complètement l'incendie de nos paysages. L'objectif d'une gestion raisonnée à long terme du risque incendie serait plutôt d'éviter les incendies dévastateurs qui ont un fort impact sur les personnes et les espaces vulnérables au feu et de tolérer un certain nombre d'usages du feu qui sont compatibles avec les activités humaines et le fonctionnement des écosystèmes.

Les risques liés aux ouvrages hydrauliques et aux digues

Contexte et état des lieux

On décompte près de 9 000 km de digues en France métropolitaine protégeant plusieurs millions de personnes contre les aléas des crues soudaines et des submersions marines. Les digues sont gérées par environ 1 000 gestionnaires

Encadré 3 - Liens utiles sur les risques en région PACA

- Toutes les informations publiques sur les risques naturels et technologiques de Provence-Alpes-Côte d'Azur seront accessibles à partir de : <http://www.paca.ecologie.gouv.fr>.
- Portail de la prévention des risques majeurs : <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/le-contexte-regional-au-niveau-des-risques-r399.html>.
- Préfecture des Bouches-du-Rhône : <http://www.bouches-du-rhone.pref.gouv.fr/risques>.
- Météo-France : <http://www.meteo.fr>.
- Ministère de l'Écologie et du Développement durable : <http://www.ecologie.gouv.fr>.
- Ministère de l'Écologie et du Développement durable (prévention) : <http://www.prim.net>.
- Légifrance (service public de l'accès au droit) : <http://www.legifrance.gouv.fr>.
- Direction départementale de l'équipement des Bouches-du-Rhône (DDE 13) : <http://www.bouches-du-rhone.equipement.gouv.fr>.
- Direction départementale de l'agriculture et de la forêt des Bouches-du-Rhône (DAF 13) – 154 avenue de Hambourg – 13285 Marseille Cedex 08 – tél. : 04 91 76 73 00.
- Direction régionale de l'industrie de la recherche et de l'environnement (DRIRE PACA) : <http://www.paca.drire.gouv.fr>.
- Direction régionale de l'environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur (DIREN PACA) : <http://www.paca.ecologie.gouv.fr>.
- Service départemental d'incendie et de secours des Bouches-du-Rhône (SDIS 13) : <http://www.sdis13.fr>.
- GeographR : http://geographr.typepad.fr/pole_metier_climat_air/2017/02/ceser_paca_adaptation_changement_climatique.html.
- IRSTEA : <http://www.irstea.fr/linstitut/nos-centres/aix-en-provence>.
- CESER PACA – mission changement climatique : [http://www.ceserpaca.fr/nouvelles/sites-internet/faq/detail-actualite.html?no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=1617&tx_ttnews\[backPid\]=1](http://www.ceserpaca.fr/nouvelles/sites-internet/faq/detail-actualite.html?no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=1617&tx_ttnews[backPid]=1).
- Programme national d'adaptation au changement climatique (PNACC1 et 2) : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique>.



Figure 6. Dignes du Petit Rhône après confortement en Arles. (Crédits : Patrice Mériaux.)



Figure 7. Dignes à la mer à Saintes-Maries-de-la-Mer. (Crédits : Rémy Tourment.)

de nature très variée et avec des moyens financiers et humains très hétérogènes. La région Provence-Alpes-Côte d'Azur compte environ 2 000 km de digues de protection contre les inondations et 200 gestionnaires.

Ces vingt dernières années ont été marquées par des événements dramatiques ayant conduit à une prise de conscience générale du danger lié à la présence de digues. Une rupture de digue provoque en effet une vague de submersion bien plus dangereuse que l'inondation à laquelle elle était censée soustraire les populations.

Afin de se protéger contre les débordements du Rhône, l'homme a construit depuis des siècles des digues fluviales. Il s'agit d'ouvrages de protection contre les inondations dont au moins une partie est construite en élévation au-dessus du niveau du terrain naturel et destiné à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables.

Dans la zone aval du Rhône, les premiers endiguements datent de l'époque romaine. Le système continu de protection que l'on connaît aujourd'hui a été élevé dans les années 1845-1860, après les grandes crues du milieu du XIX^e siècle. La construction de ces ouvrages se place dans un vaste programme porté par l'État sous l'empereur Napoléon III. Il distingue la « protection des plaines », qui sera assurée par des ouvrages en terre constitués de limons prélevés sur place, de la « protection des villes » par les quais maçonnés.

Dans leur état actuel, les digues fluviales entre Beaucaire / Tarascon et l'embouchure représentent 210 km répartis entre le Rhône, le Petit Rhône et le Grand Rhône (figure 6 *supra*). À ces ouvrages en terre s'ajoutent 5,5 km d'ouvrages maçonnés en traversée des villes. Il s'agit des quais d'Arles, des quais de Tarascon et de la Banquette de Beaucaire.

Concernant la protection contre la mer, une digue à la mer s'étend sur 25 km le long du littoral camarguais (figure 7 *supra*). Elle est élevée dans les années 1860 pour protéger les terres de Camargue des entrées marines. Elle est associée à plusieurs ouvrages connexes : épis, brise-lames et tenons, construits à partir des années 1930 au droit du village des Saintes-Maries-de-la-Mer et complétés dans les années 2000. La maîtrise de l'érosion est en effet toujours nécessaire en complément de la protection contre les inondations, mais cela est encore plus important en domaine maritime.

La région compte également un grand barrage relevant de la réglementation PPI : le barrage de Bimont sur la Cause au nord du massif de la Sainte-Victoire (figure 8). Il s'agit d'un barrage-voûte de 87 m de hauteur et retenant 39 millions de m³ à sa côte maximale. Mis en service en 1952 pour des besoins d'alimentation en eau de plusieurs communes de la région aixoise, l'irrigation de 8 000 ha, l'alimentation de la zone industrielle de la vallée de l'Arc et de la centrale thermique de Gardanne, il est construit sur la commune de Saint-Marc-Jaumegarde et domine les quartiers bas d'Aix-en-Provence puis tout le bassin de l'Arc depuis Aix-en-Provence jusqu'à l'étang de Berre.



Figure 8. Barrage de Bimont. (Crédits : Mathieu Sutter.)



Figure 9. Inondations généralisées au sud de Tarascon en décembre 2003. (Crédits : Ville d'Arles.)

Les risques liés aux ouvrages hydrauliques

Si les ouvrages hydrauliques remplissent des fonctions très utiles pour notre société telles que la protection contre les inondations pour les digues fluviales ou maritimes, ou le stockage d'eau pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation pour les barrages, ils induisent néanmoins un risque dans les zones protégées par les digues et dans les zones situées en aval des barrages. Ce risque peut être qualifié de risque couplé technologique et naturel, aléa naturel (risque hydrométéorologique ou hydrologique, risque sismique, etc.) étant souvent (pas uniquement) l'événement initiateur du risque technologique.

Ainsi, la métropole marseillaise a connu plusieurs événements d'inondation provoqués par la rupture de digues fluviales (figure 9 *supra*). Les principaux événements les plus récents sont les crues de l'hiver 1993-1994 et les inondations de décembre 2003.

Les mécanismes qui affectent les ouvrages hydrauliques sont complexes et de différentes natures selon les ouvrages et leur environnement. Pour les ouvrages en terre tels que les digues fluviales, les principaux mécanismes sont les suivants :

- *la surverse* qui se produit lorsque la crue naturelle est supérieure au niveau de sûreté de la digue. En général, une digue fluviale présente un niveau de sûreté correspondant environ à la crue ayant une période de retour de 100 ans ;
- *l'érosion interne* qui traduit un mécanisme d'arrachement et de transport des matériaux au sein de la digue ; elle peut être due à la présence de terriers d'animaux fouisseurs, au développement de végétation arbustive ou encore à des percolations non contrôlées dans le remblai ;
- *la liquéfaction* qui traduit un effondrement granulaire du matériau, dû une sollicitation dynamique telle qu'un séisme ou à une surcharge du matériau ;
- *l'affouillement* du remblai, qui peut être provoqué par le courant le long du parement des digues et aggravé par la végétation ;
- *le glissement* qui traduit des pentes de talus trop raides au regard de la stabilité des matériaux.

La gestion du risque des ouvrages hydrauliques dans Marseille et sa région

Les ouvrages hydrauliques nécessitent en permanence des actions de la part de leur gestionnaire : diagnostic, auscultation, entretien, maintenance, réparation et confortement. Ces actions doivent être conduites avec une vision plus large que l'aménagement, en prenant en compte toutes les composantes de la gestion du bassin versant et des enjeux.

Les acteurs œuvrant dans la gestion du risque lié aux ouvrages hydrauliques

Les instances en charge ou concernées par la gestion globale du fleuve Rhône ou de la mer sont les suivants :

- la DREAL de Bassin est responsable du pilotage du plan Rhône : initié dès 2005 après la survenue de crues majeures en novembre 2002 puis en décembre 2003 sur le Rhône aval et construit autour de la stratégie globale de prévention des inondations définie en 2004, le Plan Rhône constitue un vaste projet pour l'aménagement et la gestion du fleuve sous-tendu par une triple ambition : concilier la prévention des inondations et les pressions d'un développement urbain et des activités en zone inondable, respecter et améliorer le cadre de vie des habitants et enfin, assurer un développement économique de long terme ;
- élaborées et mises en œuvre par l'État en partenariat avec les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon, Rhône-Alpes, Bourgogne, Franche-Comté et avec la Compagnie nationale du Rhône, les orientations stratégiques de ce projet de développement sur le fleuve s'articulent autour de six grandes thématiques : culture et patrimoine, inondation, qualité des eaux, ressources et biodiversité, énergie, transport fluvial, tourisme. Le volet « Inondations » est piloté par la Mission Rhône (DREAL de bassin Rhône-Méditerranée, Service prévention des risques) ;
- les DREAL PACA et Midi-Pyrénées et les DDTM, chargées de la mise en place et du contrôle des politiques publiques en matière de gestion des risques d'inondation, ainsi que des procédures administratives.

Sur les digues du bas Rhône, c'est un établissement public, le SYMADREM, qui a pour mission l'entretien, la gestion et la surveillance des digues, quais et ouvrages maritimes, et qui réalise des études et des travaux sur son territoire de compétence, en vue d'améliorer la protection des biens et des personnes par rapport aux risques d'inondation du Rhône et de submersion marine.

Les actions de recherche pour la gestion des risques des ouvrages hydrauliques

L'IRSTEA développe des connaissances nouvelles et des méthodologies pour l'analyse de risques, le diagnostic et la gestion des ouvrages hydrauliques. Ses domaines d'intervention scientifiques et thématiques sont l'hydraulique, l'hydrologie, le génie civil et la géomécanique, appliqués aux ouvrages hydrauliques. Des outils et méthodes d'analyse et d'aide à la gestion intégrée des risques sont proposés au travers de l'analyse des enjeux et de leurs vulnérabilités en s'intéressant particulièrement aux liens entre la décision et l'information :

- la géomorphologie, hydrologie et hydrodynamique pour l'étude des aléas hydrométéorologiques et hydrologiques ;
- la géomécanique appliquée aux aléas naturels et ouvrages ;

- le génie civil appliqué aux ouvrages hydrauliques et de protection ;
- l'aide à la décision fondée sur une représentation et un traitement d'informations hétérogènes et incertaines.

À ces travaux de recherche s'ajoute un important volet d'appui technique et d'expertise au bénéfice des services de l'État, des collectivités territoriales et des bureaux d'études.

Prospective

Les gestionnaires de digues doivent faire face à des contraintes techniques et réglementaires de plus en plus complexes, et se sentent souvent désarmés devant ces exigences nouvelles. Leur besoin de se former et d'échanger leurs expériences pour y répondre a mené à la mise en place récente d'un réseau de gestionnaires de digues en France, l'association France Digue. Les enjeux des années à venir sont identifiés de la façon suivante :

- disposer et mettre à disposition des gestionnaires des méthodes pour ausculter et diagnostiquer les digues sur de grands linéaires : un seul point faible d'une digue peut conduire à la défaillance d'un système sur un aménagement de plusieurs kilomètres. Des technologies nouvelles (fibres optiques, auscultation thermographique, etc.) associées à des modèles mathématiques et physiques sont des solutions du futur. L'usage de drones est envisagé comme vecteur pouvant faciliter le recueil de différents types d'informations (visuelles, topographie LIDAR, thermométrie infrarouge, etc.);
- développer des matériaux écologiques présentant de réelles aptitudes à la résistance aux mécanismes de rupture, telle que la surverse ;
- développer des méthodes d'évaluation des risques, de diagnostic et d'analyse de risque et de gestion des risques ;
- développer des démarches d'évaluation de la vulnérabilité des zones protégées par les digues : vulnérabilités sociales, économiques et environnementales, disposer d'une échelle de criticité commune et reconnue par les différents acteurs permettant de comparer les conséquences en termes de risque de différents scénarios ;
- développer des bases de données rassemblant les informations sur les digues : SIRS Digues, WIKI Bardigue⁵, etc.

Les enjeux de la montée des eaux et de la protection des zones côtières du littoral sont importants, notamment en Camargue. Cette question est d'ores et déjà au cœur des thèmes de recherche des organismes de recherche tels que l'IRSTEA, avec des projets comme Digue 2020 visant à créer une plateforme de recherche sur les digues maritimes pour améliorer la maîtrise du risque de submersion.

⁵ <http://www.france-digues.fr/sirs-digues>.



Figure 10. Dommages relatifs au séisme de Provence (ou de «Lambesc»), le 11 juin 1909. (Crédits : Collection Guy Perrier.)

Les risques sismiques

Le séisme de Provence, événement de la mémoire collective du risque sismique en France métropolitaine et en région PACA

Le 11 juin 1909, le séisme de Provence (ou de «Lambesc», magnitude 6) tua 46 personnes. Le 6 avril 2009, un siècle après, le séisme de L'Aquila (magnitude 6,3) en Italie produisit 295 morts, rappelant que de tels séismes (de magnitude 6 à 6,5), bien que modérés, n'en restent pas moins meurtriers.

Le séisme de Provence est le dernier en Provence et le plus catastrophique qu'ait connu la France durant les derniers siècles. Il a détruit ou endommagé plusieurs villages dont Rognes, Saint-Cannat, Lambesc, Vernègues et Pelissanne ainsi que plusieurs quartiers de Salon-de-Provence. Ce séisme reste très présent dans la mémoire des Provençaux plus de cent ans après son occurrence : ruines, bâtiments endommagés, archives familiales ou collections de cartes postales en témoignent encore (figure 10).

Les séismes sont une des catastrophes naturelles les plus destructrices au monde et constituent un des risques majeurs en France et plus particulièrement en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, et des progrès majeurs restent nécessaires pour mieux appréhender l'aléa et le risque sismique.

PACA: une région à sismicité modérée, mais une des plus importantes du territoire français en termes d'aléa sismique

Même si à l'échelle mondiale, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est caractérisée par un aléa sismique modéré, elle n'en demeure pas moins, à l'échelle nationale, l'une des régions les plus concernées par le risque sismique (figure 11). Comme en témoigne son histoire, sa sismicité historique y est une des plus importantes du territoire métropolitain, avec depuis le xv^e siècle plusieurs séismes d'intensité égale ou supérieure à VIII (Lambesc en 1909, région de Manosque en 1509 et 1708, région de Nice en 1494, 1618, 1644, 1854, etc.), impliquant l'existence de failles actives ayant un potentiel sismogénique élevé (jusqu'à des magnitudes de 6,5). La densité de population y est localement très importante (métropoles aixoise, niçoise et marseillaise). Si l'intensité des séismes historiques est relativement élevée en PACA (intensité maximale de VII à IX et périodicité séculaire), elle ne subit qu'une faible microsismicité. L'origine et les caractéristiques de cette sismicité étaient, jusqu'à peu, mal connues: pourquoi et comment des séismes d'intensités importantes se produisent-ils dans cette zone alors que la déformation aux limites est très faible? Quelles sont les sources principales des futurs séismes? Et comment appréhender le risque sismique dans des régions à aléa modéré?

Aléa sismique en région à sismicité modérée

Les dernières recherches ont contribué à répondre partiellement à certaines de ces questions par une meilleure compréhension du comportement sismogénique des failles en domaine à sismicité modérée, notamment par le croisement des approches géologiques et géophysiques et plus spécialement en Provence, où les failles sont emblématiques et éminemment sismogènes (c'est-à-dire propices au déclenchement des séismes).

L'ensemble des disciplines liées au risque sismique doit maintenant mettre en commun les compétences couvrant l'aléa sismique – tectonique, sismologie, géodésie, etc. –, la vulnérabilité et le génie parasismique – ingénieurs, architectes, juristes, économistes, historiens et archéologue, etc. Une avancée significative a été réalisée aussi bien dans le développement des méthodes d'analyse que dans la connaissance des objets étudiés et des comportements en cas de crise.

Une meilleure compréhension existe maintenant des caractéristiques de la déformation active, du comportement sismogénique et de la prise en compte du risque dans les régions à sismicité modérée, problématique particulièrement prégnante en région PACA et d'actualité au niveau mondial (Fukushima), tant sur la maîtrise du risque «normal» (mise à jour de la réglementation parasismique, pression immobilière, etc.) que du risque «spécial», essentiellement lié aux activités industrielles (pétrochimie, grands ouvrages hydrauliques, nucléaire, ITER, etc.).

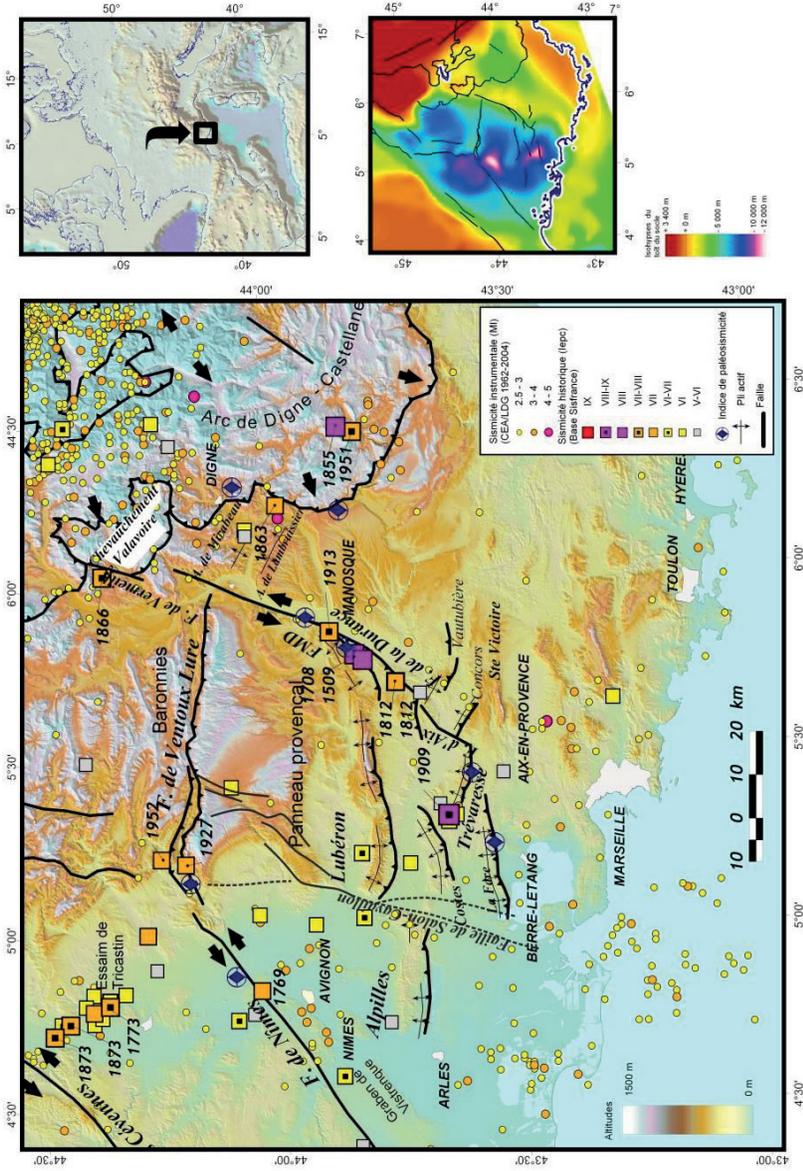


Figure 11. Modèle sismotectonique et répartition de la sismicité instrumentale et historique en Provence. Encart en haut à droite : localisation de la carte. Encart en bas à droite : profondeur de la couverture sédimentaire. (Source : d'après Cushing *et al.*, 2008 et 2014.)

Quels acquis? Qu'a-t-on appris depuis un siècle? Aléa et prévision

Le cadre géodynamique global et régional des séismes de la région PACA, c'est-à-dire le moteur à l'échelle de la tectonique des plaques, de la formation des grandes structures et de l'évolution des failles régionales, est maintenant connu de manière assez fiable même s'il existe quelques controverses scientifiques dans le détail. Les grandes zones (failles) où peuvent se produire des séismes importants sont mieux identifiées. La géologie des séismes, la paléosismologie, s'est beaucoup développée et a permis d'améliorer la connaissance des séismes majeurs très anciens (d'il y a 10 000 ans, voire plus de 100 000 ans). La compilation des archives historiques (sismicité historique) et archéologiques (archéosismicité) a également permis une amélioration de cette connaissance dans un passé plus proche à échelle humaine. Enfin, le développement des réseaux de surveillance et des techniques géophysiques nous permet de mieux connaître les structures du sous-sol proche et profond et leur comportement, même si les moyens de les utiliser manquent parfois.

On sait aujourd'hui ce qu'est un séisme: c'est une rupture et un glissement soudain le long d'une faille affectant la croûte terrestre en réaction à des contraintes tectoniques accumulées au cours du temps. On ne connaît en revanche pas encore parfaitement les phénomènes qui contrôlent les caractéristiques des mouvements sismiques et leurs effets sur le sol (accélération, liquéfaction). L'instrumentation, permanente et temporaire, et la simulation numérique ou modélisation aident toutefois à améliorer la compréhension de ces phénomènes.

Le séisme correspond à un phénomène complexe caractérisé par une grande variabilité. Il en résulte qu'il est actuellement impossible de prévoir de manière fiable l'occurrence des séismes sur une échelle de temps courte (quelques heures à quelques jours). Cette lacune concernant la prévision scientifique à court terme a été très largement illustrée par la polémique qui a suivi le séisme de L'Aquila⁶. En effet, la prévision des mouvements est entachée d'une grande incertitude. Cette « méconnaissance » épistémique diminue et se réduira à terme, mais la variabilité intrinsèque et aléatoire du phénomène « séisme » est, elle, incompressible.

Les pistes d'amélioration sont l'identification des phénomènes physico-chimiques qui semblent précurseurs, c'est-à-dire qui précèdent certains séismes. La difficulté réside maintenant dans le fait que les mécanismes qui sont à l'origine des précurseurs ne sont pas encore compris. C'est d'autant plus vrai dans la région PACA où les « gros » séismes sont rares et leur origine controversée. D'autre part, la source d'un séisme (c'est-à-dire l'initiation de la rupture) est générée sur une surface de faille restreinte de quelques dizaines, voire centaines de mètres carrés et en profondeur, alors que la surface de faille

6 Le 6 avril 2009, magnitude: 6,3. Parmi les « gros » séismes ayant affecté l'Italie dont la détection de prétendus « précurseurs » par un géophysicien « éclairé » avait fait polémique après que ce séisme fut particulièrement meurtrier, le bilan définitif faisant état de 309 morts.

sur laquelle se propagent la rupture et le glissement lors du séisme est, elle, bien connue mais très étendue et peut faire 100, 1 000 voire 10 000 km².

Pour les failles les plus actives et les mieux connues en région PACA de bonnes informations «déterministes» existent sur les séismes du passé les plus gros et donc les plus pénalisants. Cela permet une prévision à long terme fiable (magnitudes maximales des séismes et récurrence, c'est-à-dire le temps de retour de ces séismes maximums du passé et du futur) mais avec une large incertitude. Cette incertitude sur l'aléa déterministe nous conduit à avoir une approche statistique de l'aléa que l'on appelle «probabiliste» et qui est de plus en plus développée.

Prévention et vulnérabilités

En l'absence de technique de prévision fiable, la prévention reste sans conteste le seul moyen de minimiser les risques de destruction matérielle et de perte en vies humaines en diminuant la vulnérabilité. Sans prévention adéquate, un séisme comme celui de Lambesc produirait aujourd'hui de nombreuses victimes, quelques centaines de morts, des milliers de blessés, et des destructions sans précédent en France, pouvant s'estimer en millions, voire milliards d'euros de dégâts (d'après une étude menée par le ministère de l'Environnement).

Là où la Terre a tremblé, elle tremblera de nouveau. Cette loi naturelle permet une première étape vers la prévention car elle permet d'établir des cartes de zones potentiellement sismiques. Et par conséquent, à défaut de prévoir quand elle tremblera de nouveau, il est possible de définir où. L'évaluation de l'aléa sismique reposera donc, entre autres, sur l'identification et la localisation des séismes du passé et des failles qui les ont générées.

La deuxième étape de la prévention sismique consiste à prendre un ensemble de mesures pour réduire l'impact d'un séisme sur les populations, les constructions et l'activité économique :

- 1) en informant de l'existence du risque et du comportement à avoir en cas de crise (séisme);
- 2) en construisant de manière adéquate des bâtiments résistants à l'agression des séismes possibles (construction parasismique / vulnérabilité physique).

Vulnérabilité physique

En ce qui concerne la vulnérabilité physique, le retour d'expériences de catastrophes passées permet aujourd'hui de mieux cerner la «pathologie sismique», d'identifier les bonnes dispositions constructives et les très mauvaises, et, *in fine*, d'édicter des règles parasismiques qui sont efficaces quand elles sont respectées. De plus, de grands équipements expérimentaux (table vibrante, mur de réaction, centrifugeuse) ont permis de progresser sur le comportement mécanique des bâtiments et des équipements. Ils sont efficacement utilisés pour qualifier et dimensionner tous les modèles utilisés en ingénierie parasismique.

Vulnérabilité socio-économique et gestion de l'événement

Aspect économique: les connaissances scientifiques sur les phénomènes provoquant des catastrophes permettent d'élaborer des mesures (ouvrages, politiques) de prévention. Ces mesures nécessitent des coûts d'investissement qu'il s'agit de mettre en balance avec les dommages évités (dommages incluant des éléments non marchands et donc difficilement «monétarisables») et les compensations à prévoir. Les connaissances scientifiques sur les sociétés humaines ont permis de développer des théories et des méthodes de gestion de ces risques monétaires, et d'évaluer en termes monétaires des risques qui ne le sont pas. Enfin, elles offrent différentes possibilités de gérer ces risques en y intégrant les mesures de prévention qui les réduisent, ou des mesures de précaution en cas d'incertitude scientifique sur les phénomènes et sur les sociétés.

Aspect sociologique: les études menées en psychologie sociale ont montré par voie expérimentale pourquoi il est essentiel de situer l'analyse de la pensée sociale à l'articulation de l'individuel et du collectif en matière de risque sismique. Dans cette analyse, les pratiques des individus et des facteurs psychosociaux tels que leur sociabilité et leur implication personnelle sont particulièrement utiles pour l'étude des représentations sociales et des conduites liées au risque sismique.

Ces études ont montré avant tout la nature normative des représentations sociales du risque sismique, qui estompe leur composante fonctionnelle. Ce résultat explique l'efficacité réduite de ces représentations dans la prescription des conduites collectives liées au risque sismique (par exemple, le faible engagement dans la prévention collective, dans les travaux de renforcement parasismique des immeubles, etc.). Nous avons également constaté que les effets de l'implication personnelle sur la structure de la représentation sociale étaient conditionnés par l'existence des pratiques relatives au risque. Ce résultat suggère une réponse pratique à la question de la prévention collective du risque sismique.

On sait qu'une représentation sociale plus structurée, plus organisée, permet d'augmenter notre capacité à guider les conduites avant, pendant et surtout après l'événement. Ainsi, une stratégie visant à encourager la prévention collective du risque sismique est peu efficace si elle vise seulement à augmenter l'implication personnelle des individus par rapport au risque (augmenter leur intérêt, leur appréhension, insister sur la gravité des conséquences du risque, etc.). On peut penser qu'elle sera plus efficace si elle vise à impliquer les individus après s'être assurée qu'ils possèdent un niveau suffisant de pratique, soit par l'expérience vécue du séisme, soit, plutôt, par des exercices de simulation et des formations pratiques. Les études montrent que c'est sous ces conditions conjuguées que la représentation sociale du risque sismique renforce sa visée pratique et sa capacité à guider les conduites collectives.

Prospectives

L'aléa: même si nous commençons à bien connaître les failles de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et leurs séismes caractéristiques, de nombreux progrès restent à faire en ce qui concerne le comportement sismogénique de ces failles lentes et à sismicité modérée. Pour cela, en complément de la sismologie et de la géodésie, une des approches fondamentales pour appréhender l'aléa sismique, c'est-à-dire l'occurrence des séismes et leurs caractéristiques (magnitude, récurrence), est la tectonique active, couplée à la paléosismologie. Sur la base de méthodes éprouvées en domaine de tectonique très active à vitesse de déformation rapide et à aléa élevé (caractérisé par de forts séismes fréquents), une nouvelle méthodologie pluridisciplinaire, intégrant l'analyse de la topographie cumulée sur le long terme (en utilisant notamment les MNT⁷, pour avoir un signal tectonique significatif tout en discriminant les effets de l'érosion), l'imagerie géophysique fine du sous-sol et la paléosismologie sont en cours de développement en France et en région PACA, avec des résultats probants pour certaines des failles locales.

La prévision et la prévention: certains précurseurs sont identifiés mais leurs relations avec le phénomène sismique ne sont pas encore connues, les lieux où les séismes sont susceptibles de se produire sont connus, la prévision statistique des séismes attendus à long terme est réalisée, en revanche la prévision des caractéristiques des vibrations est liée à des méthodes empiriques qui restent encore à améliorer. La fiabilité des modèles de propagation des ondes sismiques est liée à la nécessité d'une bonne connaissance de la structure du sous-sol, qui est généralement non disponible. Les spécialistes savent faire «l'autopsie» d'un séisme et comprendre ce qui s'est passé, mais on ne sait pas encore dire ce qui va se passer, même si on commence à avoir des idées assez précises de ce qui peut se passer.

En ce qui concerne la vulnérabilité et la prévention, de gros efforts sont à faire et de nombreuses questions restent ouvertes:

- Comment dimensionner les ouvrages géotechniques?
- Comment évaluer puis diminuer la vulnérabilité des bâtiments existants (les méthodes de diagnostic mais aussi de renforcement)?
- Comment appréhender avec certitude (et en tenant compte des incertitudes) la vulnérabilité des industries à risque spécial (nucléaire, Seveso)?
- Comment tenir compte du vieillissement des matériaux nouveaux utilisés en construction parasismique (patins isolateurs, corrosion des armatures, renforcement des sols, etc.)?
- Comment les pressions foncières conduisant à urbaniser des zones à sols médiocres tendent-elles à augmenter la vulnérabilité face au séisme?

⁷ Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation de la surface de la terre (topographie) sous forme de coordonnées (x, y, z: latitude, longitude, altitude) adaptée à une utilisation par ordinateur.

Et enfin, en ce qui concerne la vulnérabilité socio-économique, nous pensons aujourd'hui avoir les «outils» et une connaissance suffisante de «l'événement sismique», pour faire des scénarios d'événement plausibles afin de réaliser des exercices. Toutefois, un constat important reste d'actualité, il est nécessaire après un événement de pouvoir évaluer très rapidement les dommages à l'échelle de la zone affectée ainsi qu'au niveau d'un ou de plusieurs bâtiments.

Parmi les questions fondamentales que l'on doit évoquer, il y a celle de l'apport de la recherche à la société civile: quels acquis, quelles demandes, quelles perspectives? Les apports de la recherche en termes de réponses opérationnelles pour la gestion du risque sismique au quotidien devraient être un objectif final et fondamental de nos recherches. Pour y répondre, il faut associer les scientifiques, les acteurs de la prévention du risque et de la société civile (des élus, des industriels, des représentants de l'État, des experts, des constructeurs, des assureurs et des enseignants). De nombreux thèmes devraient être abordés en commun: la connaissance du phénomène sismique, la culture du risque, la construction parasismique, la vulnérabilité du bâti ancien, la préparation à une crise sismique, etc. Pour chaque point, les dimensions techniques, politiques, sociales et économiques doivent être discutées, car chacun de ces acteurs pourra apporter un éclairage différent en fonction de ses expériences et de ses compétences.

Parmi les thèmes cruciaux qui restent à appréhender, nous pouvons mentionner:

- l'information la sensibilisation des citoyens;
- la réglementation: sa mise en œuvre et son application;
- les grands barrages et risques sismiques. Problème d'autant plus important avec le changement climatique car on peut se demander si nos barrages sont dimensionnés pour nos futures «pluies» et inondations;
- le risque industriel (Seveso, nucléaire): nos industries face aux séismes;
- la prévention: le génie parasismique, la gestion de crise;
- la société civile et l'éducation face aux séismes;
- les besoins de la société civile dans le domaine de la recherche.

En conclusion, on connaît les failles qui génèrent des séismes, on commence à comprendre ces derniers même si nous ne savons pas les prédire. De plus, on sait construire parasismique mais on ne s'en donne pas forcément les moyens, notamment en ce qui concerne l'application de la réglementation. Des pistes de «besoins de connaissance» et surtout de pluridisciplinarité peuvent être proposées dans les domaines suivants: l'information et la formation, la prise en compte des paramètres psychologiques, les «outils» socio-économiques ainsi que l'implication des assurances, tout en améliorant notre connaissance de l'aléa. Une bonne prévention réside et repose initialement sur une bonne appréhension des aléas régionaux (les failles et leurs séismes) et locaux

(conditions locales et effets de site). Des perspectives et des améliorations sont à envisager en ce qui concerne l'instrumentation (ouvrages/bâtiments), la doctrine d'amélioration de l'existant et la gestion de crise, etc.

Il convient aujourd'hui avec le recul de se demander : quel fut l'apport du Plan Séisme vis-à-vis de ces différents thèmes ? Ce dernier était un plan interministériel, mis en œuvre entre 2005 et 2010, par le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) de l'époque, afin de réduire la vulnérabilité des personnes au risque sismique et d'accompagner la nouvelle réglementation mise en place. Quel fut son apport réel ? Doit-on le « réactiver » ? Ou bien en mettre en place un plan spécifique en région PACA. Le bilan de l'analyse concernant le risque sismique, de l'aléa à la vulnérabilité, dans les zones à sismicité modérée telle que la région PACA, reste donc « l'humilité... » (« conclusion » empruntée à P. Y. Bart, ISTERre, Grenoble, lors de la Journée sur le « risque sismique » organisée sous l'égide d'ECCOREV et OT-Med, le 10 octobre 2014).

Les protections contre les risques et les défis pour le futur

De multiples acteurs s'organisent pour organiser la protection de la métropole contre les risques naturels et technologiques : métropole Aix-Marseille Provence, CR PACA, DDTM13, CG13, DREAL PACA, Pôle Risques, DRGT PACA, RiskPACA, SIMADREM, CEREMA. Le Pôle Risques (maintenant pôle de compétitivité Cluster SAFE⁸) a notamment pour mission de favoriser des solutions de gestion et de prévention des risques en faisant le lien entre sphère publique et entreprises. L'anticipation scientifique est souvent possible mais l'anticipation économique est souvent difficile. Le chantier Nature Environnement de la métropole marseillaise est ouvert à ces approches. Il existe aussi des fonds européens pour la gestion des services environnementaux (type Feder ou H2020 pour 2014-2020).

Les aléas sont généralement bien qualifiés du fait de la production de bonnes connaissances sur le type et la localisation des aléas, qui fournissent des informations sur le géoréférencement, la cartographie, des analyses historiques, etc. disponibles sur des sites web publics et dans des rapports : Atlas des risques majeurs PACA, Dossier risques majeurs BDR, DREAL Risques naturels en PACA, site RiskPACA, etc. Il existe de nombreuses politiques publiques, réglementations, stratégies de prévention et de lutte.

Les risques évoluent dans le temps et dans l'espace en fonction des évolutions socio-économiques et environnementales, notamment celles liées aux changements climatiques et aux changements d'occupation du sol. Il est ainsi essentiel de comprendre comment peut évoluer la vulnérabilité des personnes sur le territoire Aix-Marseille.

⁸ <http://www.safecluster.com>.

Un premier enjeu est de passer de la connaissance de l'aléa à celle de la vulnérabilité des enjeux. Connaître l'aléa est important mais cela ne suffit pas, notamment pour le décideur public : il faut aussi être capable de déterminer quels enjeux seront vulnérables et quels seront les dommages probables. Pour cela, il faut passer de la seule connaissance du phénomène (de l'aléa) à celle de la vulnérabilité, de la capacité de résistance et de résilience (retour à l'état initial) des sociétés, des infrastructures et de l'environnement naturel. C'est un fort enjeu partout pour l'aire marseillaise du fait de la cohabitation et de la concentration de nombreux enjeux humains, technologiques et naturels.

Plusieurs pistes existent :

- déterminer des indicateurs de vulnérabilité pour chaque type d'enjeu ;
- associer des sciences environnementales avec des sciences humaines et économiques (exemple : projet DigSur) ;
- normaliser des méthodes transposables dans d'autres régions ;
- combiner les approches pour qualifier les différentes vulnérabilités sur un même territoire (économique, environnementale, sociologique).

Une autre piste est la modélisation des risques futurs. En effet, on voit que certains aléas évoluent sous l'effet des dynamiques naturelles et humaines, souvent renforcées par les « forçages » externes comme les changements climatiques : par exemple, le risque incendie a tendance à s'étendre en fin de saison du fait des changements climatiques. De même, les risques évoluent en réponse aux politiques de gestion. Pour prévoir les risques futurs, il faut être capable d'anticiper les évolutions, mais la recherche est encore peu développée du fait des incertitudes et du manque de données. Pour modéliser ces évolutions et prédire notamment des événements rares (séisme), il est nécessaire de disposer de bons modèles et de bases de données fiables sur le long terme.

Pour ce faire, il existe des pistes telles que :

- la rupture des digues de protection de deux trémies de la voie ferrée Tarascon / Arles (trémies dites « du mas Tessier » et « des Ségonnaux »). L'inondation de la plaine du Trébon et des quartiers nord d'Arles a concerné 9 400 personnes et causé 334 millions d'euros de dommages ;
- le projet « Dignes2020 » déposé au CPER 2014-2020 ;
- les digues maritimes, cas du trait de côte (*La gestion du trait de côte*, éditions Quae, 2010) ;
- la modélisation des incendies sous l'impact des changements globaux (projet européen Fume).

Une thématique de recherche émergente dans l'aire Aix-Marseille est l'approche « multirisques ». En effet, de nombreuses communes et de nombreux secteurs sont potentiellement concernés par plusieurs aléas. Il est possible que deux aléas se produisent en même temps (concomitance) ou à la suite l'un de l'autre (cascade), ce qui peut générer un effet domino (exemple : un séisme génère une

rupture de digue, qui génère une vague de submersion). C'est une question de plus en plus présente chez les gestionnaires. Des recherches en cours existent en PACA (basse et moyenne Durance et cartographie multirisque sur le territoire Asse-Verdon-Vaïre-Var) soumise à la fois aux crues torrentielles, aux mouvements de terrain avalanches, aux séismes et aux feux de forêt. Certains de ces aléas sont mal connus et doivent être mieux caractérisés.

L'approche consiste à hiérarchiser les enjeux (bâtiments, accessibilité, environnement) là où plusieurs aléas existent, en fonction de leur rôle, de leur importance et de leur fonction au sein d'une commune, et de caractériser l'intensité des dommages en fonction de la probabilité d'occurrence des aléas. Les actions à mener sont d'informer, d'aménager et de se préparer en fonction des informations obtenues par cette démarche.

Les stratégies de prévention reposent souvent uniquement sur l'expertise technique (domaine de l'ingénierie), elle propose des choix techniques et de gestion en réponse au risque. L'analyse des risques nécessite une approche des différentes dimensions territoriales, sociales et politiques. Afin de permettre une meilleure acceptabilité des mesures de prévention par la population, il faudrait favoriser des recherches en sciences humaines et sociales (histoire, sociologie du risque) et en analyse de la décision politique :

- la notion d'acceptabilité du risque par la population est souvent peu creusée. Elle est aussi difficile à manier car l'acceptabilité est variable suivant l'acteur considéré et l'échelle considérée. Elle est généralement très faible mais elle peut fortement varier selon les personnes (assureur vs personne privée ou décideur public) et le type de risque (exemple : pollution chronique de l'air vs phénomène violent et rare de type séisme).
- l'impact de la ségrégation sociale sur l'exposition aux risques est également intéressant.
- l'analyse coût-bénéfice (approches économétriques) et le travail avec les assureurs sont eux aussi intéressants (rappel : les collectivités sont assurées si elles sont sous régime d'arrêté CatNat, sinon ce sont des assureurs privés).
- l'analyse socio-anthropologique et historique est essentielle pour comprendre quel a été le comportement des différents acteurs lors d'une crise passée et leur récupération (notion de résilience sociale), quelles leçons ont été apprises après des événements historiques catastrophiques et comment la mémoire en est conservée.

Sur le long terme, les questions de remédiation, atténuation et adaptation sont prépondérantes. En somme, il existe trois grandes stratégies pour diminuer les risques :

- 1) réduire l'aléa : gérer le risque existant, prévention, communication, information, implication des acteurs (maîtres d'ouvrage GEMAPI, personnes privées, décideurs publics);

- 2) réduire la vulnérabilité des enjeux : mesures réglementaires, gestion à long terme, etc. ;
- 3) atténuer les dommages sur les enjeux pour les rendre supportables par la société. Selon les cas, on peut agir sur l'un ou l'autre, voire sur plusieurs composantes. Face aux changements globaux, il est intéressant d'avoir une adaptation pour prévenir les évolutions possibles : il existe une stratégie nationale d'adaptation au changement climatique (cf. rapport Conseil économique et social, 2014).

Pour en savoir plus

- <http://www.symadrem.fr>.
- <http://www.france-digues.fr>.
- <http://www.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/le-site-internet-plan-rhone-est-en-a693.html>.

Résumé

- La région d'Aix-Marseille est caractérisée par une forte concentration et une grande diversité des risques environnementaux.
- La région marseillaise puise sa ressource en eau en grande partie de l'eau de la Durance (60 % de la ressource en eau de la région) et du Verdon, ce qui la rend complètement dépendante des Alpes.
- L'agglomération de Marseille (tout comme les communes d'Aix-en-Provence ou Salon-de-Provence) est dans une zone à risque important d'inondation du fait des conditions climatiques et de la forte urbanisation du territoire. La ville de Marseille et la métropole Aix-Marseille Provence ont mis en place un dispositif de surveillance et de mise en alerte.
- En moyenne, on compte 4000 départs de feux par an et 24000 ha de forêts et de milieux naturels brûlés par an sur la métropole AMP, la plupart en été. 95 % des départs de feux sont générés par l'homme, 5 % par la foudre.
- La plupart des feux sur la métropole AMP sont très petits (95 % des incendies parcourent moins de 7 ha dans les Bouches-du-Rhône). Cette taille réduite et le nombre déclinant des feux sont notamment liés à l'efficacité de la politique de prévention et des forces de lutte depuis 1993. Cependant, les quelques grands incendies qui surviennent constituent la plus grande part du risque : environ 1 % des incendies brûlent environ 80 % des surfaces touchées par les incendies. Leur fréquence et leur intensité devraient augmenter du fait des changements climatiques, de l'augmentation et de l'évolution des paysages végétaux.

- Les principales pistes pour réduire le risque incendie et ses impacts sur le long terme dans l'aire Aix-Marseille sont de nature à diminuer la biomasse, favoriser des essences adaptées et maîtriser l'urbanisation, ce qui implique de responsabiliser les acteurs privés et favoriser le sylvopastoralisme, le brûlage dirigé et l'agriculture pour entretenir des coupures de combustible au sein des paysages.
- Le séisme ayant eu lieu le plus proche de Marseille est le séisme de Provence à Lambesc le 11 juin 1909. La métropole Aix-Marseille est dans une zone à risque sismique faible (Marseille) à modéré (Aix-en-Provence).

Table des matières

Thomas Curt, Joël Guiot et Hubert Mazurek Introduction	5
Xavier Giraud et Joël Guiot Chapitre 1 Marseille face au changement climatique global	13
Francis Cann et Claude Napoléone Chapitre 2 Enjeux futurs liés à l'usage actuel des sols dans l'agglomération marseillaise	27
Hubert Mazurek Chapitre 3 Les enjeux de l'environnement urbain	41
Patrick Arnaud, Thomas Curt, Laurent Peyras, Rémy Tourment et Olivier Bellier Chapitre 4 Risques et protection	63
Laurence Affre, Magali Deschamps-Cotti, Valérie Montes, Christine Robles Chapitre 5 La biodiversité et les changements globaux	97
Samuel Robert et Isabelle Laffont-Schwob Chapitre 6 Le littoral marseillais	145
Patrick Raimbault Chapitre 7 Le milieu marin autour de Marseille	169
Thomas Curt, Joël Guiot et Hubert Mazurek Conclusions	219
Bibliographie	229
Annexe 1 Les services d'observation et les réseaux de l'OSU Pythéas	255
Annexe 2 Présentation du LabEx OT-Med	265
Annexe 3 Présentation de l'OSU Institut Pythéas	269