

2020

SCHÉMA DIRECTEUR DE LA RECHERCHE ET DES TECHNOLOGIES (SDRT)

DE L'INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE

IGN

SOMMAIRE

ORIENTATIONS & ORGANISATION

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Contexte | Erreur ! Signet non défini. |
| Évolution des orientations de l'IGN | 7 |
| Déclinaison de ces orientations en matière de recherche et technologies de l'IGN | 10 |
| Organisation externe : l'IGN dans la sphère géomatique | 13 |
| Organisation interne | 16 |

GRANDS DOMAINES D'APPLICATION

| | |
|--------------------------------------------|----|
| Référentiels géométriques et altimétriques | 20 |
| Localisation | 26 |
| Métrologie, déformations | 29 |
| Forêt | 33 |
| Géovisualisation | 40 |
| Optimisation de la production | 45 |
| Simulation | 51 |
| 3D, Ville | 55 |
| Véhicule autonome | 58 |

ORIENTATIONS & ORGANISATION

1. CONTEXTE

L'IGN est un établissement public administratif sous la double tutelle du Ministère de la transition écologique et solidaire (MTES) et du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (MAA). Il a vocation à fournir aux porteurs des politiques publiques les capacités nécessaires pour qu'elles soient décidées, suivies et dans certain cas, réalisées.

La recherche de l'IGN est mondialement reconnue, comme le montre son implication dans EuroSDR, l'International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) et l'Association internationale de géodésie (AIG). Dans le domaine du changement climatique, l'IGN joue un rôle scientifique central à l'échelle internationale pour soutenir le progrès de la mesure des changements au niveau du globe, en tant qu'acteur majeur pour la détermination des références géodésiques mondiales. Ce rôle, qui contribue au rayonnement international de la France, apporte également un appui indirect à l'effort scientifique national pour quantifier les évolutions du climat. De même, l'adaptation de la forêt au climat, et sa mesure, est une orientation importante de la recherche, car les phénomènes lents doivent être compris au mieux afin de permettre les nécessaires anticipations en matière d'aménagement du territoire. La particularité de la forêt métropolitaine française, unique en Europe par sa diversité, fait ainsi de l'inventaire forestier un outil quasi unique au monde, de compréhension de la modification du climat. La nécessaire mesure du stockage du carbone (en tenant compte de la forêt guyanaise) est un enjeu mondial. Les rapportages de l'IGN sur la filière forestière sont nationaux, européens et mondiaux (FAO).

L'engagement de l'École nationale des sciences géographiques (ENSG), donc de sa recherche, dans l'ISITE FUTURE et la future université Gustave Eiffel, a pour objectif de faire collaborer (encore) mieux les équipes du LASTIG et les partenaires Ecole nationale des ponts et chaussées (ENPC), Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), Ecole d'architecture de la ville & des territoires Paris-Est (EAV&T), Ecole d'ingénieurs de la ville de Paris (EIVP), Ecole supérieure d'ingénieurs en électronique et électrotechnique de Paris (ESIEE Paris). Cet ISITE finance des actions d'échanges internationaux. Cela bénéficiera à la renommée de la recherche de l'IGN en infogéographie au niveau mondial. *L'advisory board* de l'ISITE est composé de personnalités scientifiques étrangères reconnues.

Comme exprimé dans le projet d'établissement¹ qui répond à l'analyse effectuée par la mission parlementaire confiée à Mme Valéria Faure-Muntian sur les données géographiques souveraines, l'IGN recentre son activité sur l'appui aux politiques publiques. Les missions de l'établissement sont d'appuyer les politiques publiques, dont les politiques essentielles suivantes :

- l'adaptation au changement climatique, son atténuation, et bien évidemment sa compréhension qui constituent l'enjeu le plus fort de la société, bien au-delà de l'Europe ;
- les sujets régaliens de défense et sécurité ;
- la prévention des risques naturels ou technologiques, d'enjeu grandissant ;
- et ce qui a trait à l'écoresponsabilité : comprendre les milieux urbains et non urbains, suivre leur évolution et participer à l'anticipation de l'avenir, permettre des simulations afin de prendre des décisions publiques ;
- certaines politiques publiques plus traditionnelles, comme l'appui à l'élaboration et au suivi de grands plans nationaux et locaux (politique agricole commune, inventaire des ressources, artificialisation, urbanisme, etc.).

L'ensemble des politiques publiques nécessite des niveaux d'expertise importants, afin d'éclairer la prise de décision sur des bases solides et neutres. L'ambition de l'IGN d'être l'opérateur neutre de l'État en matière d'information géographique ne relève donc plus tant de la fourniture de données que de la fourniture d'expertise et de systèmes pour harmoniser les productions de nombreuses entités, les échanges, et les compétences, afin de dynamiser la sphère publique et privée, et de tirer parti de l'effort de production de tous (public et privé) au bénéfice de l'ensemble.

Ainsi, en matière de production, l'IGN se concentrera sur l'entretien, avec d'autres entités, de **données souveraines**, nécessaires aux prises de décisions publiques. L'État doit avoir la sûreté d'approvisionnement de ces données, et leur qualité doit être maîtrisée (évaluée et connue).

Ces premiers éléments poussent également l'IGN à s'ancrer définitivement dans la sphère des **services numériques**, et pour rationaliser la sphère publique et stimuler la sphère privée, à proposer une Géoplateforme délivrant des services de base, des services plus sophistiqués, à l'attention de sociétés privées capables de mettre en place et de maintenir des services opérationnels à l'attention de tous : ministères, grands groupes, collectivités.

Cet opérateur public de référence ne se doit pas d'être le meilleur fournisseur de *toute* donnée ou de *tout* service de la communauté. En revanche, il se doit de savoir **qualifier** les données, fournisseurs², services et technologies existantes, afin de s'optimiser lui-même et d'accompagner au mieux la réponse aux besoins des partenaires, clients et usagers. À défaut de pouvoir évaluer tout l'existant, il doit

1 Le projet d'établissement de l'IGN peut être consulté ici : <http://www.ign.fr/institut/actus/nouveau-projet-detablissement-ign>

2 On peut considérer qu'une communauté professionnelle ou grand public est fournisseur d'informations.

savoir évaluer les principales sources de données, fournisseurs, services et technologies.

Son budget est couvert en partie par la subvention pour charge de service public. Aussi pour réaliser ses missions, il fait appel à des moyens de financement bien choisis en fonction de celles-ci. La gratuité de la donnée numérique impose de fournir de nouveaux services à valeur ajoutée, dont les retombées se mesureront très certainement plus en termes d'économies réalisées pour la société, souvent diffuses, qu'en termes de ressources propres pour l'établissement.

Pour tout cela, l'IGN doit rester à la pointe de l'excellence technologique, ce qui passe par le renforcement de l'excellence de notre enseignement, de notre recherche, largement motivée par la préparation de l'avenir de notre société, de notre innovation et de nos partenariats.

Il dispose organiquement d'une capacité de recherche. La recherche de l'IGN est finalisée. Cela n'empêche pas certaines recherches fondamentales, mais les travaux de recherche s'inscrivent dans des orientations à visées applicatives à moyen ou long terme.

Ce schéma directeur de la recherche et des technologies pointe les principaux enjeux auxquels l'IGN devra savoir répondre dans les prochaines années, et dans lesquels la recherche jouera un rôle tout à fait déterminant. Concernant les technologies, il donne de grandes orientations que l'IGN doit prendre en compte dès aujourd'hui afin de pouvoir prendre en charge, de manière opérationnelle, les résultats de la recherche, ou de se préparer à l'avenir plus lointain. Il assurera la « valorisation » des travaux de recherche et la prise en charge de nouvelles technologies seul ou en partenariat, afin de mettre à disposition des partenaires d'une part, à utiliser par lui-même d'autre part, un ensemble de services numériques de plus en plus simples, souples, et puissants.

2. ÉVOLUTION DES ORIENTATIONS DE L'IGN

L'appui aux politiques publiques s'entend d'abord par la fourniture de services aux acteurs publics et privés chargés de définir, évaluer, mettre en œuvre, éventuellement contrôler et dresser le bilan des politiques publiques. Ces services résident bien entendu dans l'expertise scientifique, technologique ou méthodologique. Au-delà de cet aspect d'accompagnement de la filière par les compétences de l'Institut, les services numériques sont clairement au cœur de cette stratégie.

L'engagement vers un mécanisme collaboratif renforcé, visant typiquement à utiliser les données des acteurs locaux (collectivités locales, services de secours), sans pour autant se montrer intrusif, en respectant leur besoin, leur propre sûreté d'approvisionnement (les données produites par ces acteurs, sont souvent *leurs* données souveraines), nécessite de lire, qualifier, harmoniser, redistribuer au plus grand nombre.

La recherche de l'IGN s'oriente donc vers la définition de méthodes devant servir des compétences au plus grand nombre, des services numériques mutualisés (au-delà de la « seule » optimisation de la production de l'IGN). L'IGN pourra prototyper des services et production pour acquérir les compétences nécessaires, en intégrant des résultats de recherche, dans un esprit de renforcement de son savoir-faire afin de pouvoir conseiller, qualifier, animer.

La donnée géographique reste une donnée complexe à appréhender, d'autant que son volume et sa diversité ne font que s'accroître. Aussi, il est essentiel de la rendre intelligible au plus grand nombre, dans le contexte des dispositifs de mise à disposition de plus en plus variés et performants. Ainsi, la recherche de l'IGN s'attachera à fournir à l'IGN et en extension à la collectivité publique et privée des moyens de comprendre l'environnement dans lequel nous vivons, afin d'appuyer l'examen de situations particulières à un instant donné, les conséquences de décisions sur l'avenir, l'identification de moyens éventuels pour faire face ou s'adapter à l'évolution des contextes.

La **production** des données **géographiques souveraines** repose sur un certain nombre d'exigences. D'abord, il faut s'assurer que ces données sont indispensables à la prise de décision de la puissance publique. C'est le cas pour la majorité des données produites par l'IGN. De manière indirecte également, une donnée nécessaire à la constitution et par voie de conséquence à la maintenance de la donnée souveraine est elle-même une donnée souveraine. C'est ainsi qu'au début de la chaîne, les référentiels géométriques et altimétriques sont des données souveraines. C'est aussi le cas de l'orthophotographie, qui n'est pas nécessairement une donnée souveraine, mais sur laquelle s'appuient diverses productions de données souveraines, dont le Référentiel parcellaire graphique, sur lequel s'appuie la politique agricole commune.

Les données ne sont pas obligatoirement les plus précises possible en permanence. L'enjeu n'est d'ailleurs pas d'être au meilleur sur l'ensemble du territoire, mais de fournir des données cohérentes et **qualifiées**.

Cette qualification, qu'il faudra renforcer, relève de :

- La **précision** géométrique. L'objet est de rechercher une précision maîtrisée et garantie, adaptée aux besoins de l'État et de la société. Dans certains domaines (notamment celui des références géodésiques), cet objectif se traduit encore aujourd'hui par une recherche d'amélioration de l'exactitude. Dans d'autres cas, l'objet n'est pas de rechercher la précision ultime, mais de la qualifier avec certitude. Afin d'affirmer les niveaux de précision géométrique atteints, l'IGN doit à la fois maintenir des compétences à l'état de l'art dans les domaines de la localisation et de la mesure, et se doter des meilleurs moyens possible pour évaluer les données et systèmes d'acquisition existants. Cela pourrait conduire à mettre en place des « polygones » d'expérimentation à coût élevé, non pas pour produire, mais pour qualifier les données plus ou moins brutes, résultats et systèmes, issus de l'IGN ou non. Cela confortera l'IGN dans son rôle d'opérateur public de référence, et, qui plus est, neutre.
- Le niveau de **détail** géométrique. Suivant le contexte, le niveau de détail géométrique peut être trop important, donc inutile. Un niveau de détail trop important peut conduire, en aval à des surcoûts d'exploitation, en **simulation** numérique par exemple. En amont, cela conduit généralement aussi à des surcoûts comme ceux liés à l'acquisition ou aux contrôles, voire au stockage. Aussi, une attention particulière sera attachée, dès que possible, à l'identification de **l'effort raisonnable** dans la production des données, en s'appuyant sur une expertise entretenue sur les technologies d'acquisition afin d'assurer le compromis entre le coût (de production et d'exploitation) et le niveau de détail de cette donnée.
- Précision **sémantique**. La masse de données disponibles, et des schémas de données associées, qui représentent souvent le même monde vu au travers de terrains nominaux différents, provoque une variabilité naturelle des ontologies entre producteurs de données thématiques. Le rôle d'intégrateur de données que l'IGN se propose d'offrir, impliquera des progrès supplémentaires dans la découverte de structures, la compréhension de leurs alignements, en vue des harmonisations.
- **L'actualité** de la donnée est un enjeu extrêmement fort aujourd'hui. C'est dans l'optique de son amélioration que l'IGN a tissé depuis des années des relations de **partenariat** (de production de la donnée) avec des communautés professionnelles. L'intérêt estimé, et confirmé, de ces partenariats est que la qualité de la donnée fournie est bonne au motif que le fournisseur a lui-même besoin de ces données pour l'exercice de son métier. En géomatique traditionnelle, l'exemple des SDIS est généralement utilisé, mais le rôle des maires, pour les adresses, est aussi probant. L'actualité

présente généralement un enjeu majeur car un ensemble de services rendus à tous dépend de l'actualité au jour près (secours, courrier par exemple).

- **L'exhaustivité** de la donnée – ou sa qualification – doit rester un enjeu important pour l'IGN. En effet, la décision de politique publique dépend aussi de l'exhaustivité. Elle est plus difficile à quantifier puisqu'on ne voit pas la ou les données manquantes, sauf à la confronter à des données exogènes plus à jour, comme l'orthophotographie.

L'IGN s'attachera donc à fournir un maximum des informations qualifiées, et plus particulièrement qualifiées pour répondre à certains enjeux particuliers. Au-delà de la donnée de référence, sur laquelle appuyer certaines données métier, ces données sont capables de répondre à des questions posées dans des proportions à évaluer très sérieusement. La qualification des données portera sur les données fournies par les partenaires. Les services web de qualification seront largement ouverts aux partenaires, afin qu'ils soient très autonomes dans l'autocontrôle de leurs données.

Les premiers grands utilisateurs de ces systèmes de qualification seront les partenaires, dans le cadre de l'amplification de la **démarche collaborative de l'IGN**.

La donnée produite devra être rendue extrêmement accessible, sous la forme de **services** « de base », tels que la visualisation, les téléchargements simples. Au-delà de ces services « de base », des services plus sophistiqués de géovisualisation plus intelligente, plus anticipative des besoins de ses utilisateurs, ou les services de qualification évoqués plus haut. Des simulations plus poussées seront mises en œuvre avec des partenaires spécialisés. De grands événements organisés sur le territoire permettront à l'IGN d'implémenter un grand nombre de services présents aujourd'hui sous forme de prototypes, qui devront être durcis pour devenir des outils réels en phase préparatoire de ces événements. Au-delà, les enjeux du véhicule automatisé portent essentiellement sur la cartographie haute définition, encore en gestation, et surtout sur les amers visuels, déjà prévus dans certaines spécifications, qui sont très susceptibles d'être l'objet de valorisations importantes des travaux de recherche de l'Institut, et d'autres organisations. L'équipement de la voirie ne doit toutefois pas être ignoré, car le pari du véhicule autonome qui n'en a pas besoin n'est pas gagné. Il apparaît aujourd'hui nécessaire de mener des travaux dans ce sens.

3. DECLINAISON DE CES ORIENTATIONS EN MATIERE DE RECHERCHE ET TECHNOLOGIES

La définition et la production de données géographiques s'appuient sur la géolocalisation. Ce domaine — qui englobe à la fois la localisation (pour l'acquisition et l'utilisation des données), la définition et la réalisation des référentiels nécessaires à cette localisation, et la mesure des déformations associées à la surveillance de l'intégrité de ces références — reste un domaine d'excellence de l'Institut et un thème de recherche et de développement fondamental pour les politiques publiques.

Il concerne la géolocalisation à l'échelle de notre territoire, mais également à l'échelle de l'Europe dans le cadre des besoins d'interopérabilité entre ses nations, et du monde dans le cadre du développement du système de navigation GALILEO et du suivi des indicateurs environnementaux du changement global qui ne peuvent être observés qu'à cette échelle.

L'IGN porte dans ce domaine les moyens consacrés à la détermination du repère international de référence terrestre (ITRF), confiée par les associations scientifiques internationales compétentes à l'un de ses chercheurs. L'IGN développe également dans ce domaine une compétence scientifique de pointe sur la détermination du champ de pesanteur terrestre, nécessaire à la définition des référentiels verticaux.

Elles sont essentielles plus généralement pour l'ensemble des tâches d'observation à long terme du système Terre : les progrès en matière d'exactitude de localisation des séries longues et d'observation des déformations que permet cette exactitude continuent d'apporter de nouveaux regards sur les phénomènes telluriques (cycle sismique, volcanisme) comme climatiques (dynamique récente de la fonte des glaces...) — comme l'a montré la découverte des séismes lents il y a quelques années.

Cette contribution à la recherche bénéficie également aux objectifs plus immédiats d'appui aux politiques publiques concernant la gestion et l'aménagement du territoire. L'essor du secteur privé escompté avec l'ouverture des services GALILEO, l'évolution du cadre réglementaire en matière de localisation des ouvrages enterrés, les enjeux de localisation précise des véhicules autonomes... apportent de nouveaux besoins en matière de régulation de l'offre, de certification de la qualité de localisation, d'accompagnement des usagers pour lesquels l'État doit s'appuyer sur une expertise qui évolue avec les technologies. Les enjeux scientifiques de mesure de la Terre et de ses déformations — à la fois géométriques et de son champ de pesanteur — portent le développement de cette expertise à l'IGN.

L'IGN garde en conséquence l'ambition de conserver un leadership scientifique mondial dans le domaine des références géométriques, appuyé sur la poursuite du développement de son expertise en matière de localisation multisources et de

mesure des déformations. Dans le domaine de la localisation verticale, il vise à la fois à apporter une contribution significative à l'établissement des références européennes et mondiales, et à développer une expertise spécifique sur les liens entre variations du champ de pesanteur et déformations du sol — dans une optique d'amélioration de l'ensemble des références géodésiques.

Les objectifs spécifiques des domaines des référentiels géodésiques, des technologies de localisation et de mesure des déformations sont plus amplement décrits dans les chapitres 1 à 3.

En matière d'inventaire forestier, les enjeux sont de mettre à disposition des méthodes efficaces d'inventaire permettant la connaissance et la gestion durable des bassins d'approvisionnement, ce qui est une attente de la filière. L'actuel échantillonnage par placettes de l'inventaire national ne permet pas de comprendre suffisamment ces bassins, et les croisements des données de placettes avec des données auxiliaires en font un inventaire multisources (IMS) au bénéfice des politiques publiques (Programme national de la forêt et du bois) et ses déclinaisons régionales dans les programmes régionaux de la forêt et du bois. L'arrivée de nouveaux moyens d'acquisition LIDAR par satellite permet d'envisager des progrès notables dans l'évaluation de la ressource forestière en Guyane. Le chapitre 4 précise les objectifs de la filière.

Les moyens d'observation du territoire maintenant déployés (Copernicus, lidars aériens de meilleures résolutions) encouragent la fourniture de nouveaux services visant à améliorer la connaissance spatio-temporelle du territoire, et l'automatisation de certaines productions, au bénéfice de la représentation topographique, de la détection de changement, et d'enjeux politiques majeurs comme l'artificialisation des sols et la politique agricole commune. De moyens d'acquisition futurs (lidars aériens très haute résolution, futurs satellites très nettement inframétriques [CO3D, Pléiades Néo]) invitent nécessairement à prendre en compte l'offre satellitaire comme moyen privilégié d'observation, et à focaliser l'effort de l'aérien sur des résolutions très pointues, pour réaliser des programmes de production de précision très inframétriques (PCRS, véhicule autonome, villes en 3D). L'arrivée possible des lidars THR (Geiger, Single Photon) doit être étudiée en vue d'une exploitation possible dans les prochaines années. En matière d'acquisition, les recherches se renforceront en tenant compte de la hausse de la fréquence des données, de l'augmentation de leur densité et en tenant compte des enjeux de capacités de traitement. La recherche et l'innovation de l'IGN s'appuieront sur l'arrivée de ces nouveaux moyens d'acquisition (plus denses, plus fréquents, et souvent plus résolus), qui soulèvent des questions méthodologiques (hybridation des reconstructions, prise en compte simultanée du temps et de l'espace par exemple).

Les communautés grand public et professionnelles font partie des fournisseurs de données. Les travaux sur l'acquisition des données fournies par celles-ci seront poursuivis, tant sur la qualification que sur l'intégration des données fournies dans les données souveraines. L'interopérabilité des bases de données, la médiation et

l'enrichissement sont également des sujets très importants, d'autant que la seule information géographique ne permet pas d'expliquer les phénomènes du monde.

En matière de traitement de l'information, les opérations de constitution de données vecteur à partir de données image, de détection de changement, la fabrication de données de référence à des fins d'évaluation, de recherche et de simulation viseront la production la plus automatique de données en masse. La tendance lourde est à la fourniture de méthodes de production les plus automatiques possible de données structurées et sémantisées, à partir de données multiples et hétérogènes (satellitaire – aérien – terrestre, image LIDAR sémantique). Dans la mesure où les méthodes automatiques ne peuvent atteindre les 100 % de réalisation, il est fondamental que les processus qualifient ce qu'ils produisent, et que les méthodes permettent d'entrer en mode dégradé. Ainsi, en complément des travaux d'automatisation, des méthodes de saisie structurée – assistée par des méthodes automatiques – devront démarrer. Des objectifs plus précis, plutôt du ressort de l'optimisation de la production, sont donnés au chapitre 6. L'objet de l'optimisation de la production concerne certes l'IGN, mais aussi l'ensemble de la filière dans certains cas.

La préparation des données vise à les rendre compatibles avec des applications. L'objet ici n'est pas de travailler sur les métiers de l'ingénierie en la matière, mais de pointer la nécessaire préparation des données utiles avant la mise en œuvre des simulations (chapitre 7). L'importance de la participation active de la recherche de l'IGN dans la préparation des données en vue de l'utilisation par des simulateurs est double. À la fois, elle doit permettre de positionner l'IGN comme fournisseur de données lorsque les simulateurs deviendront eux-mêmes opérationnels (cela pourrait être le cas pour un simulateur climatique plus résolu qu'aujourd'hui, dans la suite du projet URCLIM), mais aussi d'identifier le juste effort de production nécessaire en fonction des besoins.

L'ensemble des données en jeu dans ce qui vient d'être exposé nécessite des technologies de visualisation de plus en plus sophistiquées, afin de permettre aux utilisateurs d'en comprendre la substance le plus rapidement possible, pour répondre aux questions qu'ils se posent, pour comprendre les situations auxquelles ils font face, pour pouvoir réagir, sur la base de décisions éclairées le mieux possible, en particulier en situation d'urgence. Les objectifs plus précis de la thématique de visualisation sont l'objet du chapitre 5.

4. ORGANISATION EXTERNE : L'IGN DANS LA SPHERE GEOMATIQUE

L'IGN ancre sa recherche dans des écosystèmes scientifiques de haut niveau, suivant une logique de site, appuyant ainsi la diffusion de la connaissance, tout en conservant un lien fort de l'ENSG avec le service de l'innovation, et plusieurs services opérationnels de l'IGN (SGM pour la géodésie, SDM et SISFE pour la forêt, et SDM, SIA, SV3D pour le LaSTIG).

Ainsi, l'ISITE FUTURE et l'Université Gustave Eiffel seront l'occasion de renforcer nos liens de recherche et d'enseignement avec les membres du consortium, en tout cas sur le périmètre de la ville durable et résiliente, thématique de l'ISITE et de l'université. Ces deux entités sont une opportunité réelle de mettre plus en face les enjeux sociétaux spécifiques à la ville du futur, nécessitant de plus en plus d'information géographique, de plus en plus riche et précise. Dans la mesure où la géomatique ne permet pas, à elle seule, de comprendre tous les phénomènes spatiotemporels, cette intégration dans l'écosystème permettra de renforcer les partenariats entre les recherches en géomatique, en sciences humaines et sociales, et en informatique par exemple.

Dans le domaine de la géodésie, l'intégration de la recherche de l'IGN à celle de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), UMR Université de Paris-CNRS-IPGP-IGN de la COMUE Sorbonne-Paris-Cité permettra de renforcer une approche conjointe de la mesure de la Terre (géométrie et pesanteur) et de sa modélisation, en relation avec les partenaires fondamentaux de la discipline – Centre national d'études spatiales (CNES), Observatoires astronomiques, ENS.

À Nancy, la logique est la même, avec le pôle de recherche et d'enseignement où se trouvent Agro Paris Tech, INRA, LABEX ARBRE, le LIF et d'autres partenaires. Le LIF y trouve des partenaires thématiques de référence, avec lesquels il amplifie d'ores et déjà la valeur de ses travaux (couplage des mesures de l'inventaire avec la densité observée du bois, études sur l'inflammabilité des forêts...). La statistique de sondage, au cœur de ce laboratoire, mérite toutefois une mention particulière, car la rareté de la compétence pourrait nécessiter un partenariat de long terme avec l'ENSAI.

L'IGN contribue à des services scientifiques internationaux (production de données scientifiques), met en œuvre des acquisitions expérimentales, et opère des moyens techniques (dispositifs d'acquisition, polygones d'évaluation, etc.). Ces activités motivent une participation importante de l'IGN à des **infrastructures de recherche nationales et internationales** — notamment, pour ce qui concerne les infrastructures nationales, à l'Infrastructure de recherche système Terre et à des services d'observation qui l'alimente – et pourront conduire l'Institut à porter, en collaboration avec ses partenaires, de nouvelles propositions dans ce domaine.

En matière **d'innovation**, l'IGN renforcera ses partenariats, au travers de nouveaux appels à projets *IGNfab*, mais aussi de réponses à des guichets de financements spécifiques, aux niveaux français et européen, ce qui permettra de tisser des liens avec les industriels – lesquels pourront mener a posteriori certaines industrialisations.

La recherche, développement et innovation (R & D & I) des grands acteurs qui ont la responsabilité de notre sécurité, en particulier, peut être très intéressée par certaines des recherches et innovations de l'IGN (acquisition 3D, traitement du langage, formalisation des positions relatives, détection de changement...). Ce sont autant de filières possibles pour valoriser nos travaux et en soutenir d'autres.

Au niveau plus opérationnel, la **Géoplateforme**, est certes un projet technique très ambitieux, mais elle constitue surtout un projet d'organisation des échanges de données autour des « données de référence » : les référentiels. L'objet est d'articuler les données métiers autour de ces référentiels, de la façon la plus souple et sûre possible, afin de répondre aux besoins d'entretien, de mise en cohérence, d'harmonisation et de diffusion des données.

La souplesse de la gestion de la donnée est la clé de voûte de la réussite de cette plateforme. Les partenaires locaux, dépositaires de l'autorité (les maires pour les adresses, les plateformes régionales, les autorités compétentes instanciées spécifiquement pour le géoportail de l'urbanisme), doivent voir leur vie facilitée, grâce à une simplification de l'accès aux données de référence, d'outillage simple et efficace de mise à jour des données, de qualification et de mise en cohérence. Le rythme de mise à disposition des données vers le bien commun national, en vue de l'harmonisation et de la diffusion systématique, doit se faire en respectant le rythme de vie du partenaire, qui délivrera quand *il* sera prêt, les mises à jour à la plateforme nationale.

Ainsi, en matière de données 3D riches, précises, et détaillées (chapitre 8), les partenaires locaux (essentiellement les communes dotées d'un service géomatique) doivent rester en possession de ce qui représente leur métier, au service de leur collectivité. La Géoplateforme sera le réceptacle de l'envoi des mises à jour au rythme de la collectivité. À terme, l'automation la plus poussée est souhaitée, afin de **réduire au maximum le délai** entre l'apparition d'un phénomène et sa diffusion aux services de sécurité, par exemple, de façon harmonisée. Cette Géoplateforme est attendue pour soutenir (techniquement) un certain nombre de services prévus dans les prochaines années.

Pour la communauté scientifique, la Géoplateforme est attendue pour s'interfacer avec des infrastructures de recherche existantes, au moins pour harmoniser les accès aux services (de calcul, de diffusion des données opérationnelles et des données de recherche) au bénéfice de tous, et notamment la future Data Terra (plus précisément, les services de l'État et privés devront pouvoir accéder aux données de recherche).

L'IGN entend utiliser la Géoplateforme comme catalyseur de l'innovation et de la valorisation de la recherche. Elle permettra de mettre en place des bancs d'essai et des bacs à sable très en amont, afin que la filière innovation puisse tester en grandeur « au-delà du laboratoire » les méthodes que la filière recherche conçoit. L'ambition est que la Géoplateforme dispose d'une gamme de services d'accompagnement techniques de la maturation à l'industriel.

Parmi les premiers ambassadeurs de la Géoplateforme, l'IGN devra pouvoir compter sur les élèves de l'ENSG.

À ces deux titres, il est nécessaire d'offrir des accès privilégiés, souples et prototypiques, aux filières d'enseignement, recherche et innovation, au niveau tant IGN (les agents de l'IGN), que national, voire européen.

La 3D représente à elle seule de nombreux enjeux pour l'IGN dans les prochaines années. En effet, le fonctionnement collaboratif, avec les partenaires (typiquement les collectivités locales), sera obligatoire. La complexité de la donnée nécessitera des standards et des certificateurs plus évolués. Le mélange raster-vecteur sera absolument nécessaire pour positionner les amers visuels de la manière la plus précise possible, pour le véhicule automatisé. La simulation (inondations, météorologie locale et propagation des polluants dans la ville de demain) verra son rôle renforcé dans des univers numériques, jumeaux de leur réalité.

5. ORGANISATION INTERNE

Orientations de la recherche

Au-delà du SDRT, des instances d'orientation des unités de recherche seront mises en place. Pour le LaSTIG, un comité d'orientation est prévu. Il sera opérationnel en 2020. Pour l'équipe Géodésie de l'IPGP, ce rôle est tenu par le représentant de l'IGN au conseil d'administration de l'IPGP. Au-delà des grandes orientations de la recherche, il existe certains moyens incitatifs.

Incitations à la recherche

L'IGN finance plusieurs thèses par an. Les sujets de thèse sont évalués et classés par ordre de priorité en rapport avec les intérêts de l'IGN, au cours d'un « comité des thèses ». La délégation scientifique est garante du bon fonctionnement de ce comité. Le travail de recherche conjoint avec la direction générale de l'armement (DGA) doit être démarré en 2020, afin de renforcer le partenariat nécessaire entre la DGA et l'IGN. Les échanges se feront nécessairement par le biais de la direction des programmes.

D'autres partenariats à long terme sont propices aux financements de thèses et aux travaux de fond. La convention liant régulièrement le MAA et l'IGN pour la réalisation du registre parcellaire graphique (RPG) est un bon cadre pour financer nos travaux par exemple. D'autres partenariats sont aujourd'hui en gestation.

Innovation

La recherche de financements de projets de recherche et innovation (R & I) sera menée avec l'appui de la direction des programmes et de l'appui aux politiques publiques (DP). Le pilote de l'innovation et le délégué scientifique et technique se tiendront mutuellement informés des guichets connus, instruiront conjointement l'opportunité de soumettre des projets à tel ou tel guichet de financement. Un rapportage semestriel sera fait aux directeurs de la DP et de l'ENSG sur la question (premier rapportage au deuxième semestre 2020).

Le Service de l'Innovation, de la Maturation et de la Valorisation (SIMV) mènera un certain nombre de maturations technologiques (franchissement de la vallée de la mort) sur fonds propres de l'IGN. À l'issue de ces travaux, des décisions de poursuite ou d'arrêt devront être prises par l'établissement. L'organisation idoine reste à construire. La façon de poursuivre sera instruite au cas par cas. L'ensemble du spectre est ouvert : société d'accélération du transfert de technologies (SATT), collaboration d'emblée avec un industriel, développement en propre, sous-traitance. Ces travaux porteront sur la montée en maturité technologique des travaux issus de la recherche. À cet effet, la détection des « **pépites** de la recherche » sera renforcée et professionnalisée dès 2019, avec une appropriation plus systématique d'une évaluation de la **maturité** des résultats de recherche d'une

part, et des livrables en fin de processus de maturation au SIMV. L'objet de ces évaluations chiffrées est de parfaire notre capacité à comprendre, et à évaluer les charges de travail en amont des projets de maturation, puis d'industrialisation.

Enfin, la résorption de la dette technique au sens de l'écart à l'état de l'art en matière de développement est à l'ordre du jour, avec, en 2020, la nécessité de s'approprier les terminologies, identifier les exemples, définir la politique (on peut très bien accepter une telle dette, ou estimer nécessaire de la réduire). Cette action sera menée en collaboration avec le pilote de programme innovation et le responsable du service de l'innovation.

Industrialisation et passage en production

Le SDRT s'arrête un peu avant l'industrialisation. Nous mentionnons tout de même qu'en grande majorité, les développements métier internes visant le passage en production seront menés par le Service des Développements Métier (SDM), avec l'appui du service de l'innovation et de l'expertise des équipes de recherche, tandis que d'autres le seront par des industriels. À ce titre, la DP et plus particulièrement le SPRI seront tenus informés des contacts tissés entre la recherche-innovation et les sociétés privées.

Déclinaison du SDRT

Ce SDRT est appelé à être décliné sous la forme de feuilles de route « recherche et technologies », pour lesquelles il est demandé de positionner l'IGN dans son contexte, afin de proposer les meilleurs choix de mise en œuvre, dans l'intérêt de l'IGN et de la collectivité. Les premières feuilles de route « R&T » déclinées seront celles concernant la « géolocalisation » pour les trois premiers chapitres, ainsi que celles concernant la géovisualisation (chapitre 5) et la 3D (chapitre 8).

QUELQUES ELEMENTS A PROPOS DU DOCUMENT

Ce document a vocation à être mis à jour annuellement, au maximum tous les deux ans. Il donne des priorités d'action pour neuf grands enjeux auxquels l'IGN fera face dans les prochaines années. Nous tentons de préciser les ambitions sous forme de cibles à long, moyen et court terme. Le **long terme** s'entend comme huit ans et plus. Le **moyen terme** s'entend comme trois à sept ans. Le document fera des incursions nécessaires vers le court terme.

La mise en place de services numériques associés à nos travaux est dorénavant quasi systématique lorsqu'elle est pertinente, que ce soit de la recherche (pour permettre aisément à quiconque de reproduire la méthode et vérifier les résultats ; pour « prouver le concept » avant de passer à l'étape de maturation) à l'industrialisation. Enfin, leur mise en place finalisée sera souvent opportuniste pour répondre à un partenaire volontaire, ou par des réponses à appels à projets, dont l'acceptation n'est jamais garantie.

Pour information, les enjeux sont :

- | | | |
|-----------------|-------------------------------|------------------------|
| 1. Référentiels | 4. Forêt | 7. Simulation |
| 2. Localisation | 5. Géovisualisation | 8. 3D et Ville durable |
| 3. Métrologie | 6. Optimisation de production | 9. Véhicule autonome |

GRANDS DOMAINES D'APPLICATION

1. REFERENTIELS GEOMETRIQUES ET ALTIMETRIQUES

Suivant les termes de son décret statutaire, l'IGN a pour mission de « concevoir et constituer une infrastructure géodésique cohérente avec les systèmes internationaux, et assurer la gestion du système national de référence géographique, gravimétrique et altimétrique ».

Cette mission est à la base de toute utilisation de l'information géographique. Elle s'appuie sur des compétences dans les domaines de la géodésie physique, de la géodésie spatiale, au niveau fondamental et au niveau de son utilisation pour la géolocalisation (chapitre 2), et de la métrologie au sol (chapitre 3). Les enjeux discutés ici concernent les deux premiers domaines.

L'accès par les opérateurs de l'État et par les usagers à ces références porte également des enjeux propres, abordés dans la section consacrée au domaine du positionnement.

1.1 GRANDS ENJEUX STRATEGIQUES

Dans tous les pays développés, le système de **référence géométrique** — en France le RFG93 — est réalisé à une précision centimétrique, interopérable à la même précision avec la référence mondiale — le repère international de référence terrestre (ITRF) du Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS) dont la réalisation est confiée à l'IGN depuis plus de trente ans — et accessibles à coût réduit par système de positionnement par satellites (GNSS).

Dans ce domaine, les objectifs d'amélioration de la précision concernent avant tout la **référence mondiale**, mais aussi le référencement des réseaux nationaux. L'IGN a une position très particulière sur ce sujet : initiateur, il y a plus de trente ans avec l'Observatoire de Paris, de la création du repère international de référence terrestre (ITRF), il est depuis chargé par l'IERS de sa détermination, et reste dans ce domaine en position de leader scientifique international.

Les enjeux de l'amélioration de l'exactitude de l'ITRF concernent avant tout le monitoring du changement global : l'accélération des phénomènes rend nécessaire la quantification de phénomènes non stationnaires (accélération de la montée des océans, de la fonte des calottes glaciaires, mouvements telluriques transitoires...). Il faut notamment améliorer drastiquement la qualité de mesure des mouvements verticaux sur de courtes périodes de temps, et garantir que les estimations ne sont pas polluées par les erreurs de la référence. L'amélioration de l'exactitude de cette

référence, et notamment de l'origine du repère, reste en particulier un défi majeur pour l'estimation du réchauffement de la planète au travers de l'observation du niveau des mers. Les enjeux sont donc à la fois la diminution des incertitudes des projections climatiques et l'observation en temps courts des effets des mesures climatiques internationales. Ces enjeux sont assortis d'enjeux plus généraux sur la connaissance du Système Terre — fonctionnement de la planète, évolution, risques : les dix dernières années ont montré que l'observation des mouvements jouait un rôle clé dans ces domaines.

Sur le sujet du climat et plus précisément des risques climatiques, la prévision des événements atmosphériques extrêmes est également un enjeu majeur pour notre société, et la recherche de l'IGN sur la modélisation des observables de géodésie spatiale peut y contribuer grâce à la qualification des contenus en vapeur d'eau de l'atmosphère issus des traitements.

Au-delà de ces aspects, le positionnement de l'Institut comme référent scientifique international sur le sujet du repère mondial revêt également un caractère stratégique dans le contexte international. Depuis la résolution de l'ONU affirmant la nécessité d'assurer la pérennité d'un repère mondial, un effort est engagé au niveau des nations les moins équipées pour consolider leurs infrastructures d'observation, parfois avec le soutien de la Banque mondiale. Cet effort génère de nouveaux besoins en matière d'expertise qui sont autant d'ouvertures à la valorisation des compétences françaises, légitimées notamment par la reconnaissance apportée par la détermination de l'ITRF.

Concernant la **référence planimétrique française**, la précision actuelle suffit à la très grande majorité des utilisations dans le domaine de l'aménagement du territoire. L'enjeu pour l'Institut vis-à-vis de cette partie des besoins de la société se situe plus à un niveau de maintien d'expertise en géodésie spatiale – orbitographie des satellites et exploitation des observables, pour accompagner les mutations qu'apportent les évolutions scientifiques (évolution de la référence internationale, évolution des logiciels scientifiques) et technologiques (évolution des constellations GNSS, évolution des techniques de positionnement). Il y a notamment dans ce domaine un enjeu de préservation des compétences françaises en orbitographie, développées aujourd'hui principalement au CNES. Les questions concernant la précision de la référence nationale et de son référencement restent toutefois présentes pour les applications demandant une localisation infracentimétrique.

La situation est très différente pour les systèmes de **référence altimétriques** — en France continentale, IGN69. Les pays développés ont des réalisations très précises de leur système de référence — erreurs de l'ordre du millimètre par racine de kilomètre —, mais uniquement accessibles, à cette précision, par des opérations de nivellement terrestre assez coûteuses. L'accès par GNSS n'est possible qu'avec précision dégradée (précision de un à quelques centimètres). L'entretien de la référence demande par ailleurs un entretien d'un nombre de repères au sol encore important. Les références des différents pays ne sont par ailleurs pas encore

interopérables à leur précision nominale, y compris pour des pays partageant des frontières (on peut évaluer le niveau actuel d'interopérabilité en Europe au décimètre). La référence européenne s'appuie ainsi sur un réseau de nivellement spécifique (UELN, Unified European leveling network : le réseau de nivellement européen unifié) — en France, le réseau NIREF.

Les enjeux de la recherche couvrent donc ici plus directement des besoins opérationnels nationaux et européens : qualification plus précise de la précision de l'altimétrie, diminution des coûts d'entretien des références, appui aux études concernant l'évolution de la référence française et notamment son raccordement à la référence européenne. L'émergence depuis quelques années d'objectifs de la communauté scientifique d'établir une référence géopotentielle internationale montre que vont arriver tôt ou tard des besoins d'interopérabilité des références verticales plus exigeants que ceux d'aujourd'hui. Ces besoins seront appuyés par les récentes évolutions technologiques dans le domaine de la mesure du temps, qui donneront à moyen terme accès à des mesures de différences d'altitudes centimétriques à longue distance.

La mise en place en France d'une **référence gravimétrique** assez dense (1 point pour 5 000 km²) est quant à elle très récente. Les enjeux nous semblent plus porter, dans ce domaine, sur l'évaluation de sa contribution aux références d'altitudes et en corollaire sur la définition de ses modalités d'entretien.

1.2 A LONG TERME (HUIT A QUINZE ANS)

À long terme, l'objectif pour l'Institut est de rester innovant, tant sur le plan scientifique que technique, dans le domaine des références géodésiques. La conservation d'un leadership dans le domaine du référencement géométrique à l'échelle mondiale reste un objectif en tant que moteur d'une activité scientifique d'excellence et de l'entretien d'une compétence opérationnelle de très haut niveau.

Au-delà de cet objectif de positionnement, il s'agit de tirer le meilleur bénéfice des évolutions technologiques seulement pressenties aujourd'hui et dont l'Institut est acteur :

- évolution des méthodes de traitement vers l'assimilation des observables de géodésie spatiale à des modèles de Terre ;
- évolution des observables disponibles en intégrant les observables des nouvelles missions spatiales, et notamment en prenant en compte les liens entre techniques dans l'espace ;
- évolution du spectre des techniques exploitées ouverte par les techniques d'assimilation – gravimétrie, radar à synthèse d'ouverture interférométrique (InSAR), imagerie, mesure du temps, etc. ;

- évolution de la nature des références avec la possible émergence de référentiels uniquement orbitaux, auxquels il faudra accéder depuis le sol, ou qu'il faudra accorder à des références au sol.

Dans le domaine des références altimétriques, à l'horizon de la décennie, l'ambition de l'Institut doit être d'avoir acquis un positionnement international fort, potentiellement appuyé sur la dissémination de méthodes originales de traitement des observations du champ de pesanteur. Ce positionnement doit servir celui de l'IGN producteur sur les besoins en expertise de la société dans ce domaine – dans le contexte probable d'une demande croissante des nations en constitution de références verticales.

Sur le plan scientifique, il est d'ores et déjà identifié qu'à long terme les questionnements portent essentiellement sur l'exactitude et la **stabilité dans le temps** des références. La question de la valeur métrologique patrimoniale à l'échelle de l'ensemble du territoire des réseaux de nivellement français pourra prendre de l'importance.

1.3 A MOYEN TERME

À moyen terme, les recherches de l'IGN en géodésie spatiale doivent cerner les besoins d'évolution de la référence mondiale actuelle dans le contexte du changement global. Les questions posées dans ce domaine concernent à la fois la modélisation du repère long terme qu'est aujourd'hui l'ITRF – la stationnarité des mouvements de la croûte dans le temps reste-t-elle une hypothèse adaptée ? – et les modalités de sa publication : un repère instantané doit-il être associé au repère à long terme ? Sur une Terre où tout bouge, à quelle précision sait-on dans les quelques années qui viennent réaliser un repère instantané ?

Elles doivent également accompagner l'évolution des constellations GNSS (le système Galileo devrait être au complet d'ici 2020) et des pratiques des usagers en accompagnant la montée en compétence déjà engagée du SGM sur le positionnement ponctuel précis (PPP) et le référencement des orbites des satellites. Dans ce domaine, des actions de recherche et développement devront soutenir les réflexions nécessaires sur l'évolution des produits à mettre à disposition des usagers pour leur garantir l'accès à la référence nationale ou leur permettre un contrôle de leur mise en référence.

Il faut enfin valoriser les acquis passés sur la modélisation et l'homogénéisation des séries temporelles GNSS.

Dans le domaine des références altimétriques, l'objectif à moyen terme restera en premier lieu de statuer sur l'apport des nouvelles observations apportées par les évolutions technologiques annoncées aujourd'hui – prochaines missions spatiales gravimétriques, mesures de différences de potentiel par synchronisation d'horloges

atomiques, etc., tant concernant la précision de la référence française que son interopérabilité avec la référence européenne voire internationale.

Cet objectif doit être consolidé par une maturation des technologies de représentation et de détermination du champ de pesanteur sur lesquelles l'IGN a investi depuis plus de quinze ans (modélisation stochastique, représentation multirésolution, etc.). Ces techniques doivent encore progresser pour atteindre les résolutions spatiales kilométriques compatibles avec les besoins opérationnels, et pour offrir un cadre homogène à une grande part de l'activité scientifique de l'IGN dans ce domaine. Le transfert d'une partie de ces méthodes devra par ailleurs appuyer la mise en place de chaînes de traitement plus automatiques au SGM, à la fois pour la qualification des observations (diagnostic des biais...) et pour la production de surfaces de référence des altitudes. La dissémination d'une partie des logiciels dans la communauté scientifique pourra être envisagée pour appuyer un renforcement de la position internationale de l'équipe dans ce domaine.

1.4 ORGANISATION

Les recherches de l'IGN sur les systèmes de références géodésiques et la constitution de données de référence dans ce domaine sont portées en 2019 par l'activité de quinze chercheurs (14,3 ETP), appuyés par l'hébergement d'une partie des services scientifiques portés par l'IGN par le SGM pour une charge évaluée en coût complet autour de 200 000 à 300 000 € par an.

Les ambitions de positionnement international et les objectifs de valorisation vont demander un accroissement de l'effort de recherche et de développement qui engage de s'appuyer plus fortement sur des partenariats.

Le partenariat avec l'Institut de Physique du Globe de Paris, et avec l'Université de Paris résultant de la fusion de l'Université Paris-Diderot-Paris VII avec ses partenaires, est en particulier appelé à se resserrer dans le cadre de la participation de l'IGN à l'UMR 7154 IPGP depuis le 1^{er} janvier 2019. Il doit permettre de développer les connaissances sur la dynamique de la Terre nécessaires aux progrès des références, et d'élargir en synergie l'exploration des technologies nécessaires (capteurs, architectures informatiques et méthodologie de calcul).

Ce partenariat sera complété par un rapprochement avec l'Infrastructure de recherche pôle de données et de services du système Terre (Data Terra), en projet sur la feuille de route nationale 2018, qui doit permettre de consolider les moyens de diffusion de produits scientifiques issus de la géodésie, voire les moyens de développement nécessaires à la valorisation des recherches. Il paraît notamment important que l'IGN, qui assure le portage en propre du centre de produit ITRS, continue d'appuyer la contribution française aux services scientifiques internationaux de l'association internationale de géodésie : centre d'analyse GNSS

du CNES-GRGS, centres d'analyse DORIS de l'IGN-IPGP et du CNES-GRGS, centre d'analyse SLR GRGS, Bureau Gravimétrique International.

Cette orientation n'est pas exclusive d'autres partenariats forts. La collaboration avec l'Observatoire de Paris (laboratoire SYRTE) est notamment appelée à se renforcer dans le domaine de la métrologie du temps et de son application aux références verticales. Elle étendra un partenariat historique autour de repères de référence, et de la rotation de la Terre dont le SYRTE est centre de produit pour l'ITRF.

Plus généralement, les partenaires du groupe de recherche de géodésie spatiale (GRGS), continuent de jouer un rôle majeur dans la stratégie de recherche de l'IGN. En particulier, le logiciel de traitement des observations de géodésie spatiale et d'orbitographie GINS/DYNAMO, développé par le CNES dans le cadre du GRGS, est un outil à valeur stratégique pour le succès des travaux sur l'assimilation des observations. De même, un rapprochement du SHOM est souhaitable au niveau des outils sur les thématiques connexes aux références verticales.

Cette stratégie sera complétée par la recherche de moyens auprès des guichets nationaux et internationaux — notamment sur les questions de référentiel international dont les enjeux sociétaux sont patents.

Elle sera conduite en lien étroit avec le SGM dont le rôle d'appui aux services scientifiques reste essentiel, et qui demeure, dans le cadre de sa mission d'entretien des références nationales, le premier utilisateur des résultats de la recherche.

2. LOCALISATION

Nous entendons par là la détermination de la position **planimétrique** (x,y), **3D** (x,y,z), et **altimétrique** (altitude), et souvent de l'**orientation dans l'espace** de capteurs en particulier pour des dispositifs très orientables (véhicule, tablette, smartphone, lunettes, robots...). Cela concerne évidemment aussi la détermination d'objets du monde (balises, points d'appui, toutes les données numériques de l'espace).

En tant qu'opérateur responsable de l'entretien des références géodésique, gravimétrique et géographiques, l'IGN est **utilisateur expert de technologies** de localisation de très haute précision (infracentimétrique en x,y ; millimétrique en altitude). Dans sa responsabilité de mise à disposition de ces références pour les besoins de la société, l'IGN doit par ailleurs être en mesure de diffuser cette expertise et de **qualifier la localisation** d'un usager dans les références en vigueur. Dans sa mission d'appui aux politiques publiques, il doit avoir la capacité de conseiller les services de l'État quant au **choix des méthodes** de localisation elles-mêmes.

2.1 GRANDS ENJEUX STRATEGIQUES

Depuis l'essor des GNSS, et notamment avec le développement des constellations européenne (GALILEO), russe (GLONASS) et chinoise (BEIDOU), la localisation est un enjeu économique majeur pour les pays développés. Selon la commission européenne, le marché de Galileo était évalué à 124 milliards d'euros en 2011, avec une croissance de 95 % prévue d'ici 2020 (source : Mémo EC 11/717 du 20/10/2011).

La recherche et développement industrielle de ce secteur est en conséquence extrêmement active et les technologies utilisées pour le positionnement en constante évolution.

Dans ce paysage très mouvant aux acteurs multiples, le premier enjeu pour l'IGN est le **développement de compétences de pointe, au moins à l'état de l'art**, nécessaires à la fois pour évaluer la qualité du référencement des technologies de localisation et pour faire évoluer conformément aux besoins des usagers les moyens d'accès aux référentiels nationaux.

Un second enjeu est bien entendu de tirer le meilleur parti des techniques de localisation en développement pour **optimiser ses coûts** d'entretien des références.

2.2 A LONG TERME (HUIT A QUINZE ANS)

À huit à quinze ans, le programme spatial mondial est assez bien dessiné. Dans le domaine de la localisation géométrique (2D et 3D), on n'attend donc pas de révolution technologique en deçà des calendriers de renouvellement des constellations GNSS (concernant Galileo, à compter de 2030 pour les premiers satellites de deuxième génération). Les évolutions seront très probablement plus profondes en ce qui concernera le couplage des GNSS avec les infrastructures sol disponibles, qu'il s'agisse des signaux exploitables au sol ou de l'information géographique disponible (imagerie géoréférencée et données structurées).

Compte tenu de l'ampleur du marché, il paraît très probable que des opérateurs privés — entreprises aujourd'hui traditionnelles sur ce marché, petits acteurs technologiques, ou grandes entreprises — proposent des services de localisation précise, infradécimétrique, basés sur l'assimilation de l'ensemble des sources existantes, y compris celles venant des usagers eux-mêmes, par des méthodes conventionnelles issues de la théorie de l'estimation ou non conventionnelles issues des technologies de l'apprentissage massif.

L'IGN doit être en mesure de fournir des moyens de qualification de ces localisations, notamment en termes de précision de leur référencement, et à un coût acceptable pour les usagers. Dans cet objectif, les recherches sur la qualification de la localisation par confrontation à l'infrastructure des données géographiques et sur l'assimilation de données hétérogènes massives vont rester stratégiques sur le long terme. De la même manière, l'IGN doit être en mesure d'évaluer les performances de positionnement des systèmes du marché, dont découlent les données produites, afin de pouvoir assister des partenaires dans le cadre de leurs choix de système d'acquisition.

Dans le domaine de l'altimétrie, la décennie verra l'arrivée à maturité des mesures des différences d'altitude par synchronisation d'horloges atomiques reliées par fibre optique. La technologie permettra de concevoir des systèmes transportables à cet horizon. L'IGN doit être en mesure d'évaluer dans ce contexte les besoins potentiels des usagers en termes de rattachement aux références et l'intérêt de ces technologies pour l'entretien des références verticales.

2.3 A MOYEN TERME

À l'horizon de cinq ans, l'enjeu le plus fort semble porter sur le positionnement cinématique multisources, dans le contexte de l'évolution des usages du positionnement par GNSS (apparition de capteurs mult-fréquences et multiconstellations à bas coût, développement des technologies dites PPP –

Positionnement Ponctuel Précis –, qui seront notamment disponibles librement via les services Galileo...).

D'une part, l'entretien des références géographiques et des données socles – que ce soit par l'IGN lui-même ou par ses partenaires – utilise très majoritairement ce mode de localisation. D'autre part, les enjeux portés par les questions de mobilités aujourd'hui (véhicule autonome, efficacité des secours en milieu urbain, utilisation croissante de drones, etc.) posent d'une manière nouvelle les questions d'intégrité du positionnement au sol, ainsi qu'en sous-sol ou en milieux confinés. Enfin, l'amélioration continue des capacités de localisation du grand public soulève la question de l'exploitation de remontées participatives.

Compte tenu des compétences déjà acquises et des besoins des services de l'État dans ce domaine, l'orientation adoptée vise à étendre, au sein de l'IGN, la capacité de qualification des données géolocalisées et de leurs moyens d'acquisition. Cette orientation se décline, en première approche en trois objectifs :

- la maîtrise des outils d'hybridation de données GNSS, inertiel, image, autres ;
- la capacité à jauger la fiabilité des observations acquises ou des données disponibles (amers, images, données géographiques), afin de pouvoir pondérer les sources d'information ;
- le développement d'outils ou de protocoles de qualification externe de la trajectoire de mobiles, adaptables aux différents modes de transports (rail, route, aérien).

2.4 ORGANISATION

Les recherches conduites par l'IGN dans ce domaine devront être menées en appui sur l'écosystème des partenaires publics engagés dans cette thématique – notamment l'IFSTTAR sur le pôle de recherche Paris-Est – et des industriels du secteur (industriels partenaires dans le domaine de la localisation ou industriels porteurs d'applications, automobile par exemple), avec un objectif de valorisation en utilisation interne des technologies développées, ou en alimentation des capacités des acteurs économiques.

Elles conjugueront une veille technologique pouvant inclure l'acquisition de matériels à des fins d'évaluation et des recherches sur un petit nombre de projets phares, tels que le développement de méthodologies de localisation autour des moyens de cartographie mobile. La mise en place ou la pérennisation d'infrastructures dédiées à l'évaluation de systèmes de localisation cinématique pourra également être envisagée (polygone de Vincennes, par exemple).

Elles s'appuieront sur la mise en place d'une animation transversale des compétences de l'Institut en géodésie, photogrammétrie, instrumentation et traitements cinématiques.

3. METROLOGIE, DEFORMATIONS

Dans ce document, le terme métrologie fait référence à la **métrologie géométrique**, dite encore **métrologie dimensionnelle**, aux échelles macroscopiques qui concernent la surveillance de l'environnement, l'aménagement du territoire et la préservation du patrimoine. Il s'agit donc de métrologie à des précisions généralement centimétriques ou millimétriques, voire du dixième de millimètre dans des cas très spécifiques.

3.1 GRANDS ENJEUX STRATEGIQUES

Les compétences en métrologie dimensionnelle de l'IGN demeurent à long terme un appui indispensable aux missions d'**entretien des références géodésiques** nationales et internationales — pour la mesure des positions relatives des instruments de géodésie spatiale sur les sites multi-instrumentés —, et à la cartographie des **reliefs à haute précision** (modèles numériques du terrain), mise en œuvre notamment sur les zones inondables pour la prévention et la gestion des risques, mais aussi aujourd'hui dans le domaine de la **cartographie 3D urbaine**.

L'enjeu de cette thématique en recherche est ainsi avant tout le **maintien à l'IGN de compétences** de pointe sur des techniques essentielles aux missions de l'Institut. Les activités de recherche de l'IGN dans ce domaine peuvent venir en soutien des acteurs institutionnels chargés des thématiques utilisatrices de ces mesures ou du tissu industriel concerné (dans les domaines de la surveillance d'ouvrage, de l'évaluation des aléas naturels, du suivi des déformations résultant de l'activité humaine...). Elles peuvent également bénéficier d'expertises métier de ces acteurs pour des améliorations dédiées des méthodes de mesures. Mais elles ne viseront en aucun cas à les concurrencer.

Cependant, un positionnement suffisamment fort de l'IGN dans le domaine de la mesure des déformations peut conserver une dimension stratégique pour l'État. L'inflation des données ouvertes d'observations de la Terre et de l'environnement (missions Copernicus notamment) peut générer de nouveaux besoins à la fois en matière d'**accompagnement des usagers** de produits de plus en plus complexes (estimation de la qualité, explication de la portée des observations) comme en matière de **régulation de l'offre** (expertise au service de l'établissement de normes de production, de normes de communication de la qualité...).

3.2 A LONG TERME (HUIT A QUINZE ANS)

À long terme peuvent se dessiner deux domaines de recherche principaux pour l'Institut.

En matière de **métriologie au sol et topométrie**, l'IGN accompagnera les évolutions technologiques et en tirera parti. La topométrie bénéficiera à long terme à la fois de progrès technologiques des instruments actuels (par exemple distance-mètres laser multicolores), de systèmes de positionnement par satellites enrichis de nouvelles fréquences (Galileo deuxième génération), d'observations continues des déformations longues périodes par les techniques spatiales (satellites InSAR, LiDAR...) et de l'apport d'observations hétérogènes telles que – sur un nombre limité de sites de référence – celles de la mesure du temps qui sera un jour sensible à des mouvements subcentimétriques du sol. L'Institut doit construire la capacité d'hybrider l'ensemble de ces observations pour maintenir la qualité de localisation des instruments au sol à un niveau contribuant à la qualité des références géodésiques.

En matière de **mesure des déformations**, l'enjeu pour l'IGN et pour l'État restera sans doute de rester capable de qualifier les observations et les produits nouveaux. Cette compétence nécessite une position active sur la fusion d'observations des phénomènes de déformation à plusieurs échelles de temps (de la seconde au multiannuel) et d'espace (du millimètre au kilomètre), et par plusieurs vecteurs (de la mesure locale à l'observation aérienne ou spatiale) — soit dans des domaines thématiques définis (géophysique, subsidences d'origine anthropiques, surveillance d'ouvrages...), en partenariat avec leurs acteurs, soit en développant des volets méthodologiques propres à ses besoins (cartographie 3D automatique...).

Ces deux axes principaux ne sont pas exclusifs de valorisations ciblées des compétences et des moyens mis en œuvre — par exemple dans le domaine de la numérisation 3D patrimoniale. Ils peuvent s'accompagner d'une recherche instrumentale visant soit à la mise en œuvre d'acquisitions non disponibles sur étagère, soit à la réduction des coûts de mise en œuvre ou à l'élargissement des périmètres de mesures (zones dangereuses...).

3.3 A MOYEN TERME

Plusieurs actions sont déjà engagées en cohérence avec ces orientations à long terme.

Dans le domaine de l'**instrumentation**, la valorisation du Géocube est appelée à se poursuivre en partenariat avec l'industrie : son adaptation à des réseaux étendus devrait être validée à court terme, en faisant un outil versatile pouvant équiper aussi

bien des ouvrages d'art que des zones de risques telluriques telles qu'un dôme volcanique ; l'évolution de la modularité de l'instrument permettra de l'ouvrir à de nouvelles applications de surveillance de l'environnement ; à moyen terme, on envisage également de faire évoluer le capteur de position vers l'utilisation de plusieurs fréquences GNSS. Dans ce même domaine, des développements effectués chez des partenaires pourront alimenter l'activité scientifique de l'Institut. L'automatisation d'un distancemètre conçu au LNE-CNAM est, par exemple, envisagée pour la surveillance en intérieur d'ouvrages de grande ampleur ; le potentiel d'un distancemètre bicolore issu du même laboratoire doit également être évalué pour les besoins de mesures topométriques à grande distance dans la détermination des repères de référence.

Dans le domaine de la **cartographie 3D** et de la **mesure des déformations**, un axe fort demeure l'évaluation du potentiel des technologies mobiles qui peuvent permettre de fortes diminutions de coût. Couramment utilisées aujourd'hui pour des applications de précision métrique, ces technologies n'ont pas encore atteint une précision centimétrique voire millimétrique (pour la mesure des déformations). Les recherches nécessaires font appel à l'hybridation des capteurs (optique, lidar, radar) et la collaboration des vecteurs (aérien, drone, sol) et participe également aux besoins en matière de localisation cinématique évoqués dans la section « Localisation ». Les vecteurs radiocommandés ou autonomes présentent de surcroît des perspectives de valorisation pour les acquisitions en milieu confiné ou sur des régions peu accessibles ou dangereuses.

Dans le domaine de l'**hybridation** des méthodes de mesures, la capitalisation des acquis de l'Institut s'exprimera également en explorant le potentiel de l'hybridation de l'interférométrie radar et de la corrélation optique pour le suivi des déformations sur des sites étendus – sans exclure l'utilisation d'autres capteurs (lidar Raman, GNSS...) pour lever les limitations de l'InSAR liées à la traversée de la troposphère.

3.4 ORGANISATION

Dans un contexte de ressources restreintes, l'IGN privilégiera ses domaines d'excellence, et s'appuiera de préférence sur des partenariats pour l'exploration de domaines nouveaux, dans la sphère publique ou le secteur privé. En particulier, les collaborations avec l'IFSTTAR (et donc la future Université Gustave Eiffel) pour le domaine SHM et avec le LNE-CNAM en instrumentation resteront stratégiques.

Répondant à des besoins présents dans plusieurs domaines de recherche de l'Institut, l'activité de recherche en métrologie et mesure des déformations s'appuiera, comme l'activité dans le domaine de la localisation, sur une animation transversale aux unités de recherche auxquelles participe l'Institut.

Cette recherche s'appuyant nécessairement sur la mise en œuvre d'instrumentations originales et la production de lots de données expérimentaux,

A solid red rectangular graphic located at the top left of the page.

l'IGN s'efforcera de valoriser ses efforts dans ce domaine soit en mettant les données acquises à disposition de la communauté scientifique, soit en mettant en œuvre des acquisitions prototypes en partenariat avec des utilisateurs publics, soit encore en promouvant la mise en place de bancs d'essai, voire de bacs à sable partagés, au sein des infrastructures de recherche nationales et notamment de la future IR Data Terra.

4. FORET

4.1 INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL

4.1.1 Rappel du contexte

L'inventaire forestier national actuel³ « nouvelle méthode » fonctionne pleinement sur l'ensemble de la métropole. Sur le plan théorique, un certain nombre d'extensions sont possibles dans la prise en compte des secondes visites, aussi appelées « points retour ». Ces extensions doivent encore être développées théoriquement, puis mises en œuvre dans la pratique, afin d'améliorer l'efficacité statistique⁴.

En effet, l'inventaire souffre de l'érosion progressive de sa précision, en raison de la croissance de la forêt métropolitaine (de 100 000 hectares par an, soit 0,5 % par an) et de la baisse du nombre des points mesurés en première visite. L'objectif général est donc d'améliorer en permanence l'inventaire sur la base des développements théoriques de 2004, complétés. Cela porte sur la prise en compte complète des points de seconde visite, ainsi que l'amélioration des résultats dans les chaînes de calcul.

En Guyane quelques avancées ont été menées, mais l'essentiel reste à faire. Concernant les autres départements ultramarins, il est envisagé de mettre en place des inventaires à façon pour répondre aux besoins locaux et aux enjeux de diversité des territoires. Ils ne sont pas traités ici, mais notons que la Guadeloupe a déjà fait l'objet de travaux en 2014, dans le cadre du « diagnostic des forêts en Guadeloupe », pour le Conseil Général de la Guadeloupe. Des travaux ont été également menés en Martinique en 2011. Ces cartographies forestières ont été actualisées en 2018 à la demande des collectivités, une couverture OCS à grande échelle va être réalisée à Mayotte.

4.1.2 En métropole

4.1.2.1 Objectifs à long terme

À long terme, l'objectif est de faire toujours mieux en matière d'efficacité statistique et de réactivité – flexibilité dans la mise en place des indicateurs nécessaires à l'appui et au suivi des politiques publiques. Cela peut passer, éventuellement, par

³ Qu'on n'appellera plus « nouvelle méthode », cette méthode datant de 2004.

⁴ C'est la précision (les écarts-types) rapportée à l'effort (c'est-à-dire le nombre de placettes).

des croisements des éléments statistiques avec des données auxiliaires qui aujourd'hui ne remplissent pas les critères d'éligibilité PETARD^{5,6}.

4.1.2.2 Objectifs à moyen terme

L'objectif est de tirer le maximum possible de l'inventaire forestier existant, en poussant encore certains aspects théoriques non développés jusqu'à présent et prévus vers les années 2012 et 2013. **La prise en compte des points de deuxième visite** doit faire l'objet de recherches complémentaires en statistique de sondage. On attend, grâce à cela, l'amélioration de la qualité des résultats d'inventaire pour les données déjà produites : il faut viser l'exploitation entière des points de deuxième visite.

Dans la chaîne de calcul, **des données auxiliaires** éligibles peuvent être croisées pour améliorer les résultats de l'inventaire statistique. Cette ambition nécessite des recherches, qui bénéficieront en partie à l'inventaire multisource.

Les méthodes d'inventaire multisource sont des méthodes de spatialisation de données statistiques, comme d'autres approches, dont le krigeage. L'IGN pourra évaluer l'intérêt de ces méthodes pour améliorer ses produits.

4.1.2.3 Objectifs à court terme

Il faut mettre en place les estimateurs statistiques permettant de combiner des échantillons suite à l'évolution de la méthode qui a été mise en place de 2014 à 2016. Il est très également très important, et c'est la priorité en recherche, de refonder la compétence de recherche en statistique de sondage, afin de mener les travaux d'optimisation de l'inventaire, au sens de l'amélioration de la résolution et des intervalles de confiance.

4.1.3 Dans les territoires ultramarins

La forêt guyanaise (8 000 000 hectares) représente la moitié de la superficie de la forêt métropolitaine et est spécifique par sa biodiversité et sa difficulté d'accès. Les enjeux premiers de la connaissance de cette forêt sont le volume de bois, la quantité de carbone stockée, et la mesure de la déforestation. L'accès très difficile nécessitera d'exploiter au maximum les moyens aériens et satellitaires, et donc de renforcer les méthodes de télédétection.

- La mise en place concrète de l'inventaire en Guyane, nécessairement innovant nous semble être du **long terme**. La caractérisation de la biodiversité

5 Elles sont éligibles si elles sont Pertinentes, Exhaustives sur le Territoire, Actualisées Régulièrement, et de faible coût – *Discount* (PETARD). À ce stade, la carte forestière et les photographies aériennes et leurs produits dérivés (MNS) sont de bons candidats. À terme peut-être les images Sentinel, le LIDAR aérien, les images multispectrales.

6 Lors de la conception de nouveaux indicateurs, il est toujours intéressant de chercher les nouveautés parmi ce qui existe déjà, quitte à ce que la disponibilité ne soit pas assurée. Ce sont les conclusions des études et recherches, ainsi que l'analyse économique correspondante, qui doivent à l'issue militer pour l'atteinte des critères requis, concrètement systématiser les acquisitions par exemple (dans le temps ou l'espace).

est posée aux même horizons et pourra bénéficier judicieusement des protocoles terrain mis en place s'il y en a ;

- À **moyen terme** : on peut envisager la conception d'un inventaire classique par placettes, ou d'un inventaire innovant utilisant plus de données auxiliaires. Dans les deux cas des collaborations avec des pays voisins (dont la flore est similaire), des acteurs locaux, dont l'ONF, doivent être prévues. La production se ferait à long terme ;
- À **court moyen terme** : la mise en place de la cartographie de la forêt (appelée « niveau 2 ») et du ressort de l'ingénierie, avec appui de la recherche.

Comme indiqué en introduction, les autres territoires ultramarins ne sont pas traités ici.

4.2 INVENTAIRE FORESTIER MULTISOURCES

Améliorer la précision des estimations statistiques sur de petites surfaces sans accroître le coût des mesures terrain :

*Dense en information mais spatialement peu dense +
Pauvre en information mais spatialement dense = riche en
information et spatialement dense*

Rappel du contexte

L'objectif de cet inventaire multisource (IMS) est de préciser, pour les territoires forestiers locaux, le contenu de la forêt, afin de participer à la gestion durable du territoire, dans le cadre en particulier des Plans Régionaux Forêt Bois (PRFB), et de stimuler la filière économique.

Rappelons que l'inventaire *national* perd sa pertinence au niveau local. Il faudrait densifier les placettes pour permettre d'instancier la méthode nationale au niveau local. Ce phénomène est amplifié par l'hétérogénéité de notre forêt⁷, qui rend les ventilations moins aisées. Aussi, méthodologiquement, l'IMS vise à utiliser des données auxiliaires aux critères PETARD, afin de fournir des informations **denses et valables sur les territoires et bassins d'approvisionnement forestiers**. Rappelons que l'IMS ne sera pertinent que sur les variables mesurées sur placettes corrélées avec les informations auxiliaires. L'IMS utilise déjà des données vectorielles, essentiellement la BD Forêt et la BD Topo.

⁷ Rappelons que la forêt métropolitaine est l'une des forêts les plus diverses d'Europe, sinon la plus diverse.

Le développement et l'évaluation de l'inventaire multisource en contexte de crises forestières (tempêtes, pathogènes) feront l'objet de recherches également, afin d'en améliorer encore la souplesse.

À long terme, il faut envisager :

- Un service en ligne permettant à chaque partenaire local de fournir ses propres données (non inventaire statistique) afin qu'il puisse faire lui-même ses inventaires locaux. Les premiers partenaires seront les experts de l'IGN, en cours de prestation pour un client ;
- En parallèle, des couvertures systématiques (dont le rythme est à définir) au bénéfice des acteurs locaux, en identifiant les financements correspondants.

À moyen terme, outre la recherche théorique en cours, démonstrations à l'appui, quelques leviers d'amélioration sensible de l'inventaire multisource seront envisagés :

- Une **couverture LIDAR aérienne à haute résolution**. Les lidars HR qui arrivent en ce moment pourraient nettement améliorer notre connaissance du sol et de la canopée ;
- Cette même couverture LIDAR pourrait permettre aussi de fournir une cartographie de la hauteur des peuplements améliorée. L'IGN devra donc étudier la mise en œuvre de cette amélioration ;
- **MNS** issus de calculs **automatiques** à partir de prises de vues aériennes à meilleur recouvrement longitudinal (corrélés à la hauteur, la taille de couronne, dont globalement et permettant de caractériser la quantité et structure des ressources) ;
- Une **couverture régulière Sentinel** ;
- Une potentielle **couverture super-spectrale** de meilleure résolution (la caméra de recherche super-spectrale doit aboutir à un prototype de recherche volant début 2020). À l'instar du LIDAR HR, les prix sont aujourd'hui très importants, mais baisseront nécessairement avec le temps.

À court terme, il faut vérifier le niveau de pertinence des cartes des pentes, de la climatologie locale (pluies), du contenu des sols. D'ici à fin 2020 environ, un premier IMS devra être mis en exploitation prototypique pour un partenaire, et pour préfigurer l'organisation interne de l'IGN (essentiellement la répartition des tâches entre des LIF, DIFE, SISFE et DEP).

Les travaux menés par l'IGN dans le cadre du projet européen NIVA, ainsi que ceux menés pour la mesure de l'artificialisation des sols, à la demande du MTES, sont menés en très bonne synergie. Les résultats de ces activités pourraient bénéficier également à l'amélioration de la cartographie des peuplements, BD Forêt. En temps voulu, l'IGN étudiera cette question.

Aussi, scientifiquement, le couplage de l'inventaire statistique avec deux, trois, voire cinq données exogènes non encore disponibles sera étudié, en plus des améliorations des technologies existantes sur des données déjà disponibles, comme le calcul des modèles numériques de canopée à partir des prises de vue financées par la subvention pour charge de service public.

4.3 AMELIORATION DES RESULTATS DE L'INVENTAIRE

4.3.1 Statique : nouveaux tarifs de cubage basés LIDAR Terrestre

À ce jour, aucun inventaire n'utilise de tarifs de cubage de bois en volume total aérien et/ou volume branches issus de bases de données « arbre » reconstitués par T-Lidar et représentatives, bien que cette technologie permette de façon ultime de résoudre proprement ces questions de quantification dans le contexte technologique actuel. Il y a donc deux enjeux de recherche :

- Constituer une base de données représentative du territoire pour l'ensemble des espèces forestières d'intérêt ;
- Développer des tarifs de cubage de nouvelle génération fondés sur cette donnée, pour lesquels il n'existe qu'une expérience de référence mineure (terrain nouveau).

L'objectif à **court et moyen termes** est de poursuivre les travaux de recherche visant à développer les algorithmes de reconstitution d'arbres pour lesquels le projet européen **Diabolo** forme une base, à constituer la base de données de référence, puis à développer les tarifs de cubage « nouvelle génération ». La validation des algorithmes de reconstitution est majeure pour valider la donnée de référence, et passer à la mise en exploitation de ces modèles. Pour autant, il n'existe aucune source représentative de données de validation (auquel cas l'approche T-lidar serait infondée). Cette approche doit reposer sur les protocoles de mesures complètes de l'inventaire, sur des campagnes d'échantillonnage terrain *ad hoc* dans lesquelles l'inventaire et le LIF s'engagent, et sur de la simulation expérimentale.

Le DIFE est attendu pour les développements associés dans les chaînes de calcul, au bénéfice du SISFE qui opérera les chaînes.

4.3.2 Statique : amélioration de la connaissance de la biomasse et du carbone stocké

La biomasse n'est pas directement proportionnelle au volume, et ce dans des proportions non négligeables (avec des densités du bois qui peuvent varier du simple au triple à espèce forestière donnée). L'enjeu est de permettre de véritables estimations de la biomasse et du carbone forestier au niveau national, avec une

vocation au *reporting* carbone international, et en tenant compte des recherches actuelles du projet **XyloDensMap** qui visent à constituer une base de données représentative de la densité du bois des espèces forestières, et à développer les modèles de densité du bois qui pourront être projetés dans les dimensions spatio-temporelles de l'inventaire forestier (cartographie et séries historiques de biomasse). L'objectif est de mettre en place une méthode opérationnelle à **court terme**. L'effort est essentiellement porté par une collaboration entre l'IGN et l'INRA.

4.3.3 Dynamique : monitoring du changement climatique

L'objet est de mettre en place un système de monitoring des conséquences du changement climatique, temporellement continu et spatialement significatif, sur des indicateurs des conséquences du changement climatique sur les forêts. On tire ici parti d'une originalité sans précédent de l'inventaire, reposant sur le fait que ce dispositif constitue une mesure de champs scalaires (mortalité, croissance, distribution) dépendants du temps. Après avoir *détection* ces variables (par exemple mortalité plus forte dans une région), les travaux de recherche visent à comprendre ces conséquences, et à fournir l'information de référence pour agir (pour atténuer ou s'adapter). La représentation cartographique des écarts à la moyenne ou à la tendance pluriannuelle sera importante pour *sensibiliser* l'ensemble des acteurs de la filière.

À long terme, ce monitoring devra être en place en routine pour un appui continu aux politiques publiques. **À court terme**, la recherche livrera des preuves de concept (détection des anomalies, et cartographies associées).

Une collaboration avec l'équipe GéoVis du LaSTIG est attendue pour améliorer la conception des cartes en continu. Une collaboration avec l'équipe LAREG de l'IPGP est attendue sur la détection des anomalies dans les signaux.

4.3.4 Dynamique : modélisation et compréhension en temps long

La dynamique à long terme de la forêt doit être revisitée par la recherche (caractérisation et modélisation), afin de pouvoir anticiper à un horizon compatible avec celui du changement climatique. Les nouvelles recherches en cours visent à développer des simulateurs de dynamique forestière aptes à prendre en compte dynamique forestière et changement climatique, et ayant une vocation souveraine, lien avec l'expertise forestière notamment. Ces derniers doivent également permettre l'intégration de la densité et des volumes plus précis réestimés par les nouvelles approches basées T-Lidar, ainsi que les modèles de prévision de la biomasse. De tels modèles n'existent pas à ce jour au niveau européen.

À moyen terme, ces travaux devront être validés par la confrontation aux mesures passées et réelles, autant que faire se peut. Le changement climatique est déjà en œuvre. Un vrai sujet réside dans la séparation des phénomènes à climat constant, et dans la prise en compte des forçages climatiques. Pour ce faire, l'approche privilégiée repose sur une hybridation de modèles fonctionnels validés sur les données d'inventaire, et de ces modèles de dynamique à grande échelle.

À long terme, il faudra mettre en place un simulateur anticipant l'état de la forêt dans plusieurs décades, en fonction des actions politiques entreprises, et de l'évolution du climat. Prendre en compte les risques

4.4 ORGANISATION

Un facteur d'économie réside dans un renforcement de la collaboration entre le MATIS et le LIF, en particulier sur les aspects de visualisation et de traitement et des données LIDAR. L'injection d'iTownS comme composant de visualisation de COMPUTREE doit être étudiée en 2020, et démarrée au plus vite. Il s'agit d'un autre facteur d'économie, mais à l'échelle nationale.

Les activités de recherche menées au SISFE méritent d'être validées et suivies par le LIF.

La mise en production des résultats de recherche relève toujours du SISFE, et dans certains cas, à instruire au cas par cas, les développements correspondants sont du ressort du DIFE. À ce titre, le DIFE doit être informé régulièrement (une fois tous les six mois, à l'occasion des comités de suivi) des avancées effectuées par la recherche.

À court terme, il est proposé que l'ensemble des éléments relatifs à la forêt guyanaise soient concentrés vers une « cellule stratégique Guyane » capable de coordonner les efforts, les suivre, et rendre compte à la direction des programmes et à la conseillère auprès du directeur général. Il est proposé que le SISFE préside cette cellule. Il aura en effet à terme la responsabilité de la qualité des résultats d'inventaire.

5. GEOVISUALISATION

5.1 CONTEXTE

Le déluge de données et la multiplication des technologies de calcul, stockage, média⁸ de visualisation proprement dite renforcent l'intérêt de disposer, pour l'utilisateur, de moyens simples de voir pour **comprendre**, et au-delà, prendre des décisions et en suivre les effets, à plus ou moins court terme (de la gestion de l'urgence au suivi pluriannuel de politiques publiques en routine). Dans un certain nombre de cas, il faudra savoir expliquer, zoomer dans les données, allant ainsi de manière continue du plus généralisé – compréhensible – au plus brut et précis, en adaptant la visualisation en continu.

Ce que l'utilisateur d'un système de géovisualisation voit, c'est une partie toujours infime d'un système beaucoup plus complexe qui est mis en œuvre pour lui rendre les choses aisément interprétables, compréhensibles et utilisables. Lui fournir des supports adaptés à ses besoins, à ses capacités perceptives et cognitives, et à son contexte d'usage (pression de l'urgence, niveau d'expertise requis, support de visualisation, outdoor/indoor, utilisation individuelle, collective ou participative, etc.) est une chose ardue.

5.2 A LONG TERME

À long terme, l'ambition pour l'IGN est de donner accès au bon niveau d'information à un utilisateur (ou un groupe d'utilisateurs) dans un contexte donné, chacun ayant un rôle potentiellement différent et un matériel de visualisation potentiellement différent (écran, lunettes...) tout en offrant une forte interaction entre homme et machine, permettant de piloter intuitivement des représentations dynamiques de bases de données complexes. Ces représentations doivent faciliter la compréhension de ce qui est présenté.

Le contexte a donc vocation à être adaptatif suivant de nombreuses dimensions (liste non exhaustive) :

- **Échelle** : échelle quasi **continue**, du détail à l'extrême généralisation (schématisation). Les travaux traditionnels de l'IGN sur les questions de généralisation cartographique doivent dans tous les cas être adaptés aux

8 Écran, smartphone, lunettes 3D en réalité augmentée, diminuée, ou virtuelle, salle immersive...

nouveaux contextes et nouvelles technologies (de visualisation, d'apprentissage...);

- **Utilisateur** : l'utilisateur est une dimension de la question à part entière. Il peut avoir des difficultés de perception (déficience visuelle, âge), ou de compréhension (âge, difficulté mentale), être un professionnel (pompier, statisticien, etc.), un passionné (pilote amateur, randonneur, etc.), ou un simple utilisateur par loisir ou nécessité. L'utilisateur peut aussi être un groupe d'utilisateurs aux responsabilités et compétences variées, auquel le « système de géovisualisation » doit fournir les éléments communs, cohérents et adaptés à chacun. L'adaptation des méthodes de géovisualisation doit également être faite au bénéfice des personnes en difficulté, comme les daltoniens, malvoyants, personnes aux facultés cérébrales amoindries ;
- **Nature de l'information** : spectre large allant du point au volume 3D en passant par les champs de vecteur 3D dynamiques, la représentation de la sémantique, des incertitudes, de l'absence d'information, des agrégations, des données multiplexées, des résultats de simulation également de différentes natures et de différents niveaux de structuration de l'information ;
- **Structure de la donnée** : de la donnée fortement structurée dont le schéma est connu à l'avance à la **donnée faiblement structurée, disparate** pouvant être **découverte à la volée** et (ce qui est typiquement le cas des données noSQL), et en ligne ;
- **Paramétrage** : d'un paramétrage manuel par **l'utilisateur** à un paramétrage automatisé, flexible, **compris par le système**, en fonction du besoin, du contexte, des habitudes de l'utilisateur et de ses interactions, du dispositif d'affichage. La compréhension des besoins de l'utilisateur se passe en temps réel (en fonction de ses interactions et mouvements, de la compréhension par le système de ses intentions...);
- **Temporalité** : une donnée **passée, présente, future**, voire virtuelle dans le cas d'hypothèses concurrentes (de projets, de résultats de simulation [voir le projet URCLIM, PLU++], etc.), ou disponible en continu dans un flux de données ;
- **Un style de représentation graphique** : depuis le choix d'un style parmi N, jusqu'au continuum des styles possibles (de nombreux paramètres de rendu et de représentation sont virtuellement continus) ;
- **Délai d'affichage** : un **temps** de représentation du monde allant de quelques heures dans le pire des cas à l'instantané (symbolisation mise en cache, représentation de données issues de capteurs, en temps réel, visualisation progressive).
- **Données simulées** : une attention particulière doit être donnée à la donnée simulée. En effet, la simulation est un moyen de plus en plus nécessaire pour éclairer la décision publique. Aussi, il faudra à la fois fournir des éléments de représentation des incertitudes, et la possibilité de naviguer dans les scénarios de simulation, et les données à l'origine des simulations, pour appréhender plus en profondeur, si nécessaire, les retombées des décisions.

L'IGN fournira ainsi des moyens d'agir face aussi bien aux **situations d'urgence** (par exemple aux acteurs de la sécurité) qu'en régime standard, par exemple en appui aux politiques publiques pour lesquelles il fournira des moyens de **prise de décision, mesure et suivi** de ces politiques.

Il est à noter que la vocation de l'IGN est de fournir des **composants** (par opposition à « système complet ») traduisant les compétences développées au cours du temps, quitte à ce que l'industrialisation soit faite sur les systèmes ad hoc (e.g. poste de pilotage d'un avion, système d'information d'un poste de commandement / gestion de crise) par d'autres entités que l'IGN. Ces composants seront fournis sous forme de services en ligne / hors ligne et pourront inclure des entrepôts ou des éléments logiciels facilitant l'intégration de ces composants dans les systèmes clients. L'IGN fournira son expertise complète sur ses composants afin d'en faciliter l'intégration dans les outils des clients.

5.3 A MOYEN TERME

Pour un certain nombre de composants de géovisualisation, l'IGN doit être prêt, à moyen terme, à fournir des systèmes numériques de géovisualisation qui seront utilisés pour des partenaires devant traiter des situations critiques ou des événements de grande ampleur, comme des événements sportifs, et pour lesquels les composants sont prêts. Pour répondre à des sollicitations ponctuelles, pour lesquels les composants nécessaires ne sont pas prêts, relevant donc de l'innovation, l'IGN se mobilisera pour valoriser ses travaux en soutenant la déclinaison plus ou moins spécifique de ses compétences dans des systèmes clients. Nota : les déclinaisons sont proscrites si elles ne relèvent pas de l'innovation et que l'IGN a engagé des partenariats industriels utilisables à cette fin.

En matière de recherche, deux voies doivent être poursuivies :

- **l'interaction homme-machine** : il s'agit de permettre de configurer finement les systèmes de géovisualisation pour répondre aux besoins de l'utilisateur, tout en *apprenant* de son comportement. Ces travaux largement explorés jusque-là sont revisités sous l'angle de l'optimisation de systèmes de géovisualisation nD et de contextes d'usages variés : ils donneront des résultats à moyen terme, maquettes à la clé ;
- **la génération à la volée** : c'est un véritable enjeu également, afin de fournir une qualité cartographique la meilleure possible, sous contrainte de temps (le plus rapidement possible après l'acquisition de la donnée).

5.4 A COURT TERME

L'objectif étant d'avoir un système en production, les équipes chargées de la montée en maturité des travaux de recherche (SIMV puis SDM) auront à valoriser des travaux de recherche, de façon pragmatique, afin d'assurer la robustesse des outils mis à disposition dans ce contexte. Cela se fera sous le pilotage du responsable de projet « jeux olympiques 2024 », avec l'expertise de la recherche. Ce mode non connecté imposera qu'une partie de la Géoplateforme, ou du Géoportail, soit reproduite en milieu confiné, et que les répliques de certains composants logiciels, et de certaines données soient possibles lorsque le partenaire le demande.

En matière de recherche, les deux piliers à construire sont ceux liés aux aspects cognitifs de l'utilisateur et à la généralisation en temps le plus réel possible pour :

- que le système comprenne de mieux en mieux ce dont l'utilisateur a besoin, en comprenant comment il voit, perçoit, comprend et utilise les géovisualisations, tout en faisant en sorte qu'il ne lui en coûte que le minimum pour l'exprimer. À ce titre, une exploration de certaines approches de l'intelligence artificielle pourrait être bénéfique ;
- que la capacité de rédaction de forte qualité rejaillisse pleinement dans les représentations en temps réels mentionnées dans ce chapitre.

5.5 ORGANISATION

En matière de recherche

La participation active de l'équipe Geovis à différents projets de recherche, dont **UrbaRiskLab** (un projet de nature TREEMPLIN dans le cadre de l'ISITE) est un exemple majeur d'intérêt de la géovisualisation dans la gestion des risques. C'est l'occasion de comprendre les besoins exprimés par les acteurs opérationnels et décideurs impliqués dans l'amélioration des décisions, et qui ont besoin de meilleures technologies de visualisation. Au passage, notons que les partenaires expriment, au-delà des besoins de géovisualisation, un certain nombre de besoins sur leur problématique métier, qui peuvent bénéficier à l'ensemble de l'Institut. Au-delà, le partenariat avec l'INRIA doit être maintenu, quant aux aspects de rendu et d'interaction homme-machine pour la géovisualisation. Le partenariat avec l'IFSTTAR sur les géovisualisation (visualisation immersive, visualisation de résultats de simulations) doit être renforcé dans le cadre de l'UGE.

L'Université Gustave Eiffel est l'occasion de renforcer les liens avec l'équipe Geovis, en rapprochant encore les recherches en sciences cognitives d'une part, et en évaluation de politiques publiques (comme avec le laboratoire EMERITE).

Une collaboration avec le LIF est attendue pour valoriser la plateforme de recherche iTowns au bénéfice des modélisations des arbres à l'issue des levés T-Lidar.

Les bénéfices possibles de l'intelligence artificielle seront explorés à compter de 2019, en vue de travaux futurs, potentiellement différenciateurs plus tard.

Par ailleurs en aval

Par ailleurs, il paraît urgent d'évaluer l'écart entre les capacités acquises par les équipes de la recherche de l'IGN et le reste de l'IGN, afin de monter en maturité certaines technologies par le service de l'innovation, maturation et valorisation (SIMV). Un état de l'art sera donc démarré en 2020, par le pilote de programme innovation et le délégué scientifique et technique afin de démarrer la prise en main d'une à deux technologies « pépites » de géovisualisation au SIMV.

Pour les politiques publiques en général, qui permettent une plus grande souplesse technologique (que les milieux confinés, voire fortement durcis du Ministère des Armées) dans le cadre de l'appui général aux politiques publiques, les systèmes de visualisation de plus en plus sophistiqués – mais simples d'usage – seront mis en place par incréments, par le service des développements métiers.

Une autre opportunité est également à saisir, à savoir ancrer l'IGN dans la sphère nationale de la sécurité civile qui s'engage résolument dans le sens d'une recentralisation des moyens techniques à des fins d'économies et d'harmonisation des pratiques. Par exemple, les centres d'appel des pompiers, ou encore le SAMU, nécessitent de telles re-centralisations. Dans ce cadre, nous serions amenés à :

- évaluer notre capacité (compétences, technologies, coûts) à mettre à disposition un clone de son système, à disposition de ces entités ;
- nous préparer à fournir des répliques des données pour mettre à niveau les systèmes hôtes fonctionnant en milieu confiné.

6. OPTIMISATION DE LA PRODUCTION

Il s'agit d'optimiser à la fois les productions de l'Institut, mais aussi des partenaires. Le projet d'établissement vise en effet **l'efficience d'ensemble** de la sphère publique.

6.1 OPTIMISATION DE LA SEGMENTATION - CLASSIFICATION

L'occupation et l'usage de sols sont une connaissance nécessaire à de nombreuses politiques publiques (agricole, environnementale, urbaine...). Les moyens d'acquisition multipliés, et les promesses de l'apprentissage profond font augurer de capacités de classification automatique de plus en plus perfectionnées.

L'IGN doit continuer à exploiter le filon de l'apprentissage profond, notamment sur les séries temporelles.

L'interaction avec les infrastructures de recherche, Data Terra en tête, est posée. Le positionnement des méthodes de l'IGN par rapport à ces infrastructures sera étudié dès 2020 (comment les valoriser dans ces infrastructures ?).

6.2 OPTIMISATION DE LA DETECTION DES MISES A JOUR

La détection de changement est un service demandé par plusieurs partenaires, en échange de la mise à disposition de leurs propres données, dans le cadre de la démarche collaborative. Les satellites Sentinel permettront de détecter plus aisément les mises à jour et de qualifier l'usage des sols.

Une exploitation des données Sentinel permettra de détecter plus souvent, et mieux, les mises à jour du terrain afin d'améliorer *l'actualité* des données de référence. C'est le deuxième aspect différenciant principal pour une donnée de référence. L'exploitation des données nécessitera des puissances de calcul très importantes (à évaluer), et l'IGN doit s'en doter. Un focus sur l'infrastructure de calcul est mentionné au chapitre 5. Un scénario serait d'utiliser les détections automatiques pour les fournir à notre réseau de partenaires de mise à jour en continu, en vue de saisies sur le terrain.

6.3 OPTIMISATION DES MOYENS D'ACQUISITION

6.3.1 La caméra numérique de production

L'IGN commence à acheter des caméras numériques de production pour les orthophotographies traditionnelles, à 25 centimètres, mais aussi, de plus en plus, pour mener des campagnes d'acquisition à des résolutions infradécimétriques. La recherche reste en appui des unités opérationnelles pour spécifier et tester les caméras acquises, mais s'oriente plus fortement vers une caméra multispectrale, en vue d'optimiser les capacités de classification décrits ci-dessus.

6.3.2 La caméra super-spectrale

À moyen terme

Disposer d'une caméra super-spectrale 12 canaux industrielle (ou 6 à 12 filtres variables, ou entre les deux) est un véritable enjeu, dont il faudra tout de même démontrer la viabilité économique et l'apport pour les produits auxquels elle répondra. L'utilité à moyen terme, et d'abord à court terme, devra donc être démontrée en continu, en parallèle de la recherche d'un industriel qui pourra fabriquer la caméra et la maintenir.

Les deux grandes classes d'utilisation sont le milieu urbain, ce pour quoi la version 6 têtes a été conçue, mais aussi le milieu forestier, en particulier pour les inventaires multisources. La collaboration LIF-MATIS-LOEMI est bien entendu attendue sur ce dernier sujet.

À court-moyen terme

Le choix devront être faits sur la base d'expérimentations afin de définir l'optimum entre :

- Nombre de têtes ;
- Filtres ;
- Facilité d'exploitation, y compris le changement des filtres si nécessaire (avec ou sans recalibration, à évaluer) ;
- Capacité de l'électronique à absorber les 12 têtes ;
- Aspects économiques ;
- Industriels présents.

À court terme

La caméra super spectrale de recherche doit être poussée jusqu'aux vols de preuve de faisabilité, y compris l'exploitation des images acquises pour en valider les

résultats. À l'issue une industrialisation sera envisagée (sur la base d'évaluation de besoins, en 2020).

6.3.3 Le lidar

L'arrivée des lidars haute voire très haute résolution doit nous permettre de fournir des données plus précises ou produites plus automatiquement. Le projet d'exploitation d'un lidar à 10 ou 20 points par mètre carré envisagé en 2019 (soumission au fonds de transformation de l'action publique– FTAP) nécessitera de penser, voire repenser, l'organisation des données et processus, dans la mesure où l'augmentation de la densité nous fera franchir un ordre de grandeur.

L'opportunité de tester les méthodes actuelles et nouvelles, y compris les travaux de recherche en cours, sur ces données, nécessitera une mobilisation de la recherche et de l'innovation pour montrer rapidement, par la preuve, les intérêts réels de l'augmentation de cette densité.

6.3.4 Stéréopolis et LI3DS

A moyen terme, ces moyens d'acquisition et leur développement pourront être menés conjointement avec d'autres organismes (l'IFSTAR par exemple) afin de renforcer l'équipement, de le maintenir au meilleur niveau, et de développer des variantes (par exemple un drone terrestre en lieu et place du viapolis), d'en soutenir les applications possibles.

A plus court terme, la priorité numéro un concernant ces vecteurs est de garantir leur positionnement absolu.

- Maîtrise dans le sens suivant : savoir en fonction des conditions d'acquisition (très dense, dense, peu dense), et des moyens mis en œuvre (points d'appui / de contrôle), le positionnement absolu obtenu. En dresser le bilan, y compris les coûts correspondants ;
- Amélioration de notre capacité à positionner en absolu le véhicule (ou réduire les coûts à exactitude identique).

En permanence, en tâche de fond :

- Harmoniser autant que faire se peut, et par blocs, les suites logicielles Stéréopolis V3 – Sac à dos ;
- En simultané, même sujet, mais entre DIL et MATIS (et autres entités concernées).
- Nous n'abordons pas la notion de « plate-forme » conjointe DIL MATIS ou de « socle » car ces termes ont des significations différentes pour les uns et les autres. L'objectif est de minimiser les coûts globaux de transfert R→I→D (et réciproquement D→R et D→I) et les risques de perte de compétence globale de l'Institut sur ces outils.

Il est également nécessaire de garantir la possibilité de changer de capteur en assurant la modularité de l'ensemble, à coût et délais maîtrisés. Un point essentiel est

de mutualiser autant que possible, par blocs les briques logicielles de l'outil de production Stéréopolis et les briques de recherche correspondantes. En 2020 un plan de travail sera établi sur ce sujet.

Ces outillages seront utilisés pour construire un jumeau numérique d'une partie du campus Descartes. Ce jumeau numérique devra servir à la conception de la ville du futur, sous tous ses aspects. Cette impulsion permettra aussi d'amplifier la collaboration avec les partenaires et de renforcer les recherches et innovations technologiques conjointes.

6.3.5 Drones

Sous réserve d'un assouplissement de la réglementation en matière de survol par les drones, il est tout à fait envisageable de compléter localement les acquisitions aériennes et terrestres par des couvertures par drones (aériens ou terrestres eux-mêmes), pourquoi pas à visée oblique, afin de traiter simultanément ces données de sources différentes mais complémentaires. Cela se fera au bénéfice de la complétude des informations, et de la précision.

Il est donc judicieux d'anticiper cet assouplissement, qui sera bénéfique à la cartographie en zones urbaines en particulier.

6.4 AUTOMATISATION DES RECONSTRUCTIONS GEOMETRIQUES ET SEMANTIQUES

La poursuite des recherches pour automatiser au maximum les reconstructions est nécessaire. L'un des enjeux principaux est d'être capable à terme de prendre en compte simultanément des données d'origines variées (par leur nature : imagerie, LIDAR), leur précision variable.

Néanmoins, sans attendre l'automatisation complète, nous devons prendre en considération que, d'une part des données moins abouties que la reconstruction « parfaite » peut répondre à des besoins, et que d'autre part la reconstruction manuelle, peut être nécessaire (voir la section suivante).

Au titre de la reconstruction automatique il faudra valoriser, dans les prochaines années les travaux permettant de fournir :

- des MNS régulés (intégrant des contraintes de verticalité des façades et, parfois expurgés des superstructures) ;
- des triangulations ;
- des extrusions ;
- reconstruction type LOD 2, LOD 3.

S'agissant de reconstructions à **large échelle**, le partenariat avec le laboratoire d'informatique de l'école polytechnique a vocation à être renforcé, ainsi qu'avec l'Université Technique de Delft.

6.5 OPTIMISATION DE L'IHM

Saisie structurée

L'intelligence de la visualisation est déjà traitée au chapitre 5. Dans le sens homme vers machine, l'utilisation de systèmes de saisie structurale (procédurale) permet d'accélérer les saisies, tout en conservant les caractéristiques nécessaires à l'objet créé ou mis à jour. Les modèles utilisés, voire les grammaires de modèles, inversent en effet le principe de saisie habituel « bottom up » en utilisant un a priori qui réduit drastiquement l'espace des possibles : la forme recherchée. Ces méthodes interactives de saisie devront bénéficier d'assistants issus de travaux de recherche, afin de limiter l'espace des solutions grâce à l'attache aux données (par exemple orientation automatique d'un bâtiment), ou d'affiner les mesures (par exemple positionnement automatique d'un élément de mobilier urbain).

Suivant la tendance à l'amélioration permanente de la précision de saisie, la nécessité de respecter les contraintes de modélisation, et le besoin scientifique de comprendre la dépendance des modèles de simulation à la finesse et précision des données, et les besoins d'amers visuels pour le véhicule autonome, dont les caractéristiques restent à découvrir, l'IGN s'attachera à mettre en place un système de saisie structurée fortement assistée. Ce système sera composé de deux grands éléments : l'outillage de saisie proprement dit et des technologies issues de recherche qui permettront d'optimiser les saisies. Ces technologies permettront, de façon non exhaustive : de proposer des modèles présélectionnés pour laisser un choix restreint à l'opérateur, d'assister la saisie en tenant compte de technologies de reconnaissances des formes calage, apprentissage, de façon transparente.

L'IGN doit donc fournir des outils de saisie de base permettant de saisir des objets simples, ainsi que des services permettant d'augmenter ces outils de base vers des modèles structurés plus complexes.

Ces optimisations de l'IHM serviront dans plusieurs domaines différents. D'abord lorsque les reconstructions automatiques échouent, et que les logiciels de qualification signalent que la reconstruction est erronée, alors le passage en manuel assisté, voire en manuel, peut s'avérer nécessaire. C'est le cas :

- Pour des productions de masse, qui sont utiles sur des territoires étrangers, pour répondre à des besoins de la Défense. Sur ce point, pour préparer l'arrivée de nouveaux satellites et délivrer à nos forces des technologies de production de

données 3D des métropoles urbaines sensibles, le coût de production doit être optimisé (cf. feuille de route R & I Défense) ;

- Ensuite, dans le cadre de productions prototypiques, pour préparer des données dans le cadre d'expérimentation pour la conception de nouvelles bases de données et de systèmes futurs, comme pour le véhicule autonome ;
- Enfin, pour identifier le juste effort de production au regard des modèles de simulation : des catalogues de modèles seront utilisés pour produire des données les plus détaillées et précis possibles, afin de valider l'intérêt (ou pas) pour des modèles de simulation (de propagation, d'intervisibilité « floue ») ;
- Pour se localiser proprement dans les milieux complexes en ville, où l'on s'aperçoit que malgré tout, le positionnement des médias grand public ou semi professionnel (tablettes, téléphones), ne permet pas encore de se recalibrer de manière précise et fiable pendant un temps suffisant, avec la seule fourniture des données vecteur RGE. Les résultats du projet Smart City Vision sont à cet égard convaincants.

Ces travaux pourront s'appuyer sur les collaborations avec l'INRIA déjà en cours sur les sujets d'interface homme-machine.

7. SIMULATION

7.1 CONTEXTE

Les données apportent de la valeur lorsqu'elles sont utilisées. Pour de nombreuses politiques publiques, elles sont utilisées pour construire des simulations en vue de prendre des décisions (compréhension, atténuation et adaptation au changement climatique, plans de prévention des risques, croissance de la forêt, gestion durable, urbanisme, calculs de positions de firs, niveaux d'ensoleillement locaux, etc.).

Pour que les simulations soient pertinentes, elles doivent être efficaces (atteindre la cible visée), mais aussi être accompagnées d'un « indicateur de confiance ». Par exemple : le grand public comprend peu à peu l'intérêt des indicateurs de confiance, comme celui introduit par Météo France pour les prévisions quotidiennes ; les personnels techniques ont, quant à eux, besoin d'indicateurs plus poussés pour bâtir, au-delà des simulations, des raisonnements économiques, par exemple dans le risque assurantiel.

La confiance dans la simulation passe également par la confiance dans le modèle de simulation et l'étude de sa sensibilité (réactions du modèle en fonction des données en entrée et de leur variabilité) et par la confiance dans la précision des données en entrée. L'expert utilisant le simulateur est également un facteur clé de réussite et de qualité des simulations (même si cela est plus difficilement quantifiable, le savoir-faire de l'expert varie d'une personne à l'autre).

La collaboration avec Météo France dans le cadre du projet URCLIM a vocation à être poursuivie et renforcée, afin de mesurer l'impact de la précision des données fournies au modèle de simulation en cours d'étude. Cela pourra préfigurer des données socles futures, nécessaires à la problématique climatique.

Nota : la filière de la simulation utilise le terme de modèle pour désigner le simulateur proprement dit, à l'opposition des modèles de données utilisés largement en géomatique.

7.2 ENJEUX

À long terme

L'IGN n'a ni la vocation ni les moyens de fournir tous les simulateurs nécessaires à ses partenaires, entre autres parce que cela pourrait faire appel à des compétences

métier dont l'institut ne dispose pas. Ceci étant, sur le long terme, l'objectif est bien de rendre les données « simulables », ce qui signifie : fournir les données, éventuellement **adaptées**, nécessairement **qualifiées**, conformes à la nature et à la qualité de simulation recherchée, au **meilleur effort**.

L'IGN devra ainsi disposer d'une équipe aisément mobilisable, façon « produits externes », afin de travailler à la commande sur des demandes de fourniture de données en vue de simulations, ou de fourniture de processus permettant de produire la donnée en question, à partir de données préexistantes et de traitements (dont des croisements avec des données exogènes). Ici, l'enjeu est principalement de comprendre comment les incertitudes se propagent dans les traitements « simples » (au regard des simulateurs). Autrement dit, la problématique est de répondre à la question suivante : **quelle est la dépendance de la qualité du résultat à la qualité des données en entrée** (sensibilité des modèles aux données) ? *Nota* : on s'intéresse ici uniquement à la qualité des données en entrée et non pas celle de paramètres externes⁹ et internes¹⁰ des modèles ou de l'influence de l'expert utilisant la simulation. La réponse à cette question sera vraisemblablement, dans la très grande majorité des cas, expérimentale mais pourra être également (peu souvent) théorique.

Enfin, l'IGN poursuivra la veille technologique et théorique sur ces sujets et enrichira en continu ses données sur les terrains d'expérimentation.

À Moyen terme

Dans le cadre d'événements majeurs, comme des événements sportifs ou des manifestations, il est probable que des outils de simulation soient mis en œuvre, par exemple assurer la sécurité de l'événement (calculs d'intervisibilité, simulation de mouvements de la foule en fonction des obstacles, optimisation du placement des dispositifs de surveillance, etc.). L'objectif pour ces événements est que les données géographiques socle nécessaires, soient prêtes, et couplées avec les données complémentaires utiles, que les outils de calcul de de simulation le soient également. Dans ces événements, la réussite du projet sera facteur de confiance de différents acteurs de la sécurité, et notamment le ministère de l'intérieur. Ce type de projet structurant mobilisera de façon emblématique la Géoplateforme.

Nous devons disposer de données sur la ville à des niveaux de détail les plus poussés possible. Ils serviront à des simulations fines, et moyennant une simplification des données, à l'évaluation de la qualité de simulation tenant compte de la simplification. Cela doit permettre d'appréhender le bon niveau de détail (nécessaire et suffisant, donc, a priori, de bon effort). À cette fin, mentionnons le terrain d'expérimentation idéal de l'ISITE pour démarrer en matière de données avec les partenaires pouvant fournir les modèles (de simulation).

9 Paramétrages « visibles » (température de recuit, nombre d'itérations, etc...)

10 Paramétrages nécessaires informatiquement, souvent codés en dur (avant de renvoyer des exceptions)

Les simulations de type SimPLU seront opérationnelles (c'est-à-dire opérées et maintenues par une entité non-recherche).

À court terme

Nous devons commencer à disposer de maquettes de ville très détaillées sur certains terrains d'expérimentation, dont la cité Descartes où se trouvent les partenaires IFSTTAR, ENPC, UPEM, etc.

Ce sujet est lié à deux sous-sujets : le projet SimPLU et les capacités de simulations offertes par l'Institut des Systèmes Complexes (ISC PIF).

Sur le projet SimPLU, il s'agit de pouvoir répondre à des demandes lorsqu'elles arriveront (préparation de l'avenir) :

- Proposer, définir et valider une stratégie de l'Institut par rapport à la spin-off Trempline, puis la mettre en œuvre. Éventuellement nous chercherons à travailler en partenariat avec une autre société¹¹ ;
- Se préparer à industrialiser la suite SimPLU (en interne ou en sous-traitance).

Sur les capacités de l'ISC PIF et les calculs associés, il s'agit de transférer 80 % de la **compétence d'utilisation** de l'ISC PIF en distribution de calcul et parallélisation à d'autres équipes de la DSTI que l'ENSG, afin de faire percoler la compétence, pour pouvoir à terme les solliciter. Concernant les aspects métier liés à SimPLU (modélisation et instanciation des règles d'urbanisme prises en charge), les compétences doivent être complètement prises en charge.

Enfin, une visite des standards devrait être menée afin d'acculturer les agents à ces bonnes pratiques.

7.3 FOCUS SUR LES BESOINS EN EQUIPEMENTS D'EXPLOITATION DE CALCUL MASSIF

Pour mener leurs actions, les équipes de recherche de l'IGN utilisent certaines architectures (GPU, clusters, grille de calcul, cloud, etc.) afin de distribuer ou paralléliser des calculs de simulation, notamment pour la calibration, l'exploration et l'étude de la sensibilité des modèles ou afin de mener des apprentissages (deep learning), et l'étude de la sensibilité aux paramètres. Un renforcement au fil de l'eau sera utile, éventuellement en mutualisant des investissements avec les partenaires de l'ISITE.

En phase de conception de nouveaux produits, par exemple, pour répondre à de nouveaux usages, ces technologies sont une opportunité pour aller plus vite en

¹¹ La société Trempline a toutefois l'avantage que nous maîtrisons déjà certaines de leurs technologies (OpenMole ici), même si le passage d'une technologie à l'autre s'apparente au changement de langage de programmation (à paradigme identique).

phase d'étude, dès lors que la ressource est aisément accessible, et les compétences partagées. Sous ces hypothèses, le passage à l'échelle sera également mieux maîtrisé et plus aisé.

Pour passer à une phase d'industrialisation, l'IGN aura besoin de renforcer son accès à des outils similaires capables de répondre à des sollicitations temporairement très fortes. Il s'agit de se préparer à passer à l'échelle en deux étapes :

- d'abord en préproduction : dans cette étape, l'objectif est d'obtenir une vérification d'aptitude des processus parallélisés (c'est-à-dire. la VA de la mise en œuvre « relativement massive » de la parallélisation) ;
- puis en production réelle.

En phase de conception de nouveaux produits également, pour répondre à de nouveaux usages, ces technologies sont une opportunité pour aller plus vite en phase d'étude, dès lors que la ressource est aisément accessible, et les compétences partagées. Sous ces hypothèses, le passage à l'échelle sera également mieux maîtrisé et plus aisé.

Ainsi, nous recommandons la prise en main, dès 2019, de certaines compétences en distribution et en parallélisation massive des calculs par les équipes chargées de la montée en maturité des technologies (SIMV) et des développements industriels et opérationnels (SDM), éventuellement sur l'infrastructure de l'ISC PIF (à titre transitoire, avec pour point de vigilance que l'infrastructure ISC PIF est faite pour soutenir la recherche), avant de démarrer sur une infrastructure définitive, à dimensionner et mettre en place dans les deux prochaines années. Cette infrastructure opérationnelle ne sera pas nécessairement interne. L'étude en cours actuellement devra faire des propositions de solution pour répondre aux besoins.

L'enjeu essentiel de la mise à disposition d'outillage de calcul de masse est d'intégrer cette capacité d'emblée dans la conception des futurs traitements. Cela permettra d'économiser du temps de nos agents en phase de conception, à l'instar de ce qui s'est produit il y a quelques années où l'accès à la RAM a permis de passer moins de temps à économiser quelques octets. Aujourd'hui, l'enjeu n'est plus la mémoire ou la puissance de calcul, largement accessible, mais l'empreinte écologique de la puissance de calcul installée. Ainsi, une attention particulière sera portée sur la mutualisation des outils de calcul ainsi que sur leur rapport performance/empreinte.

8. 3D, VILLE

8.1 POSITIONNEMENT

L'IGN renforce sa démarche collaborative, visant à échanger des données et services en particulier avec les collectivités locales. Les tiers de confiance concernés disposent par construction de moyens d'entretien des données de leur territoire pour répondre à leurs propres politiques locales.

Les enjeux essentiels sont de consommer les données des tiers de confiance, d'en faire bon usage, et en particulier de les diffuser de façon harmonisée aux entités nationales (ministères des Armées, de l'intérieur). Rappelons que certains SI dans ces ministères se réharmonisent comme celui de la police et de la gendarmerie, ce qui offre d'ailleurs des opportunités à terme, en matière de fourniture de données et de services adaptés aux agents de terrain.

8.2 A LONG TERME

L'IGN intégrera des données des partenaires, les utilisera pour mettre à jour les données souveraines en soutien des toutes les thématiques adressées par l'IGN. En échange, il fournira des systèmes industrialisés de détection de changement utilisant si nécessaire les données acquises par les partenaires, les dispositifs de détection de mises à jour sont demandés en priorité par les partenaires actuels. Il fournira aussi des systèmes de standardisation et de certification des données, nécessaires aux échanges.

Pour ce qui est de l'entretien des informations du partenaire, l'IGN proposera des systèmes prototypiques facilitant la mise à jour et l'entretien des données dans le contexte urbain. L'industrialisation des systèmes en question sera prévue et conçue au cas par cas.

En relation avec les politiques de développement durable et d'adaptation aux risques, en appui à la recherche et aux politiques publiques, l'IGN produira des modèles 3D urbains très poussés (précis et résolus, couplés avec des données de réseaux souterrains). Ces modèles serviront à des simulations (aérodynamique, bruit, ensoleillement, aérodynamique et propagation des polluants), afin d'appuyer la conception durable des villes d'une part, et d'autre part, scientifiquement, de comprendre l'incidence du gain en matière de simulation – et donc d'aide à la décision – au regard des coûts investis.

La couverture du spectre comprendra le domaine public y compris les milieux couverts (tunnels, parkings, centres commerciaux...).

Enfin, la réglementation demandera que les plans des nouvelles constructions soient fournis à des entités publiques (non nécessairement l'IGN) avant les constructions proprement dites, que ce soit pour les bâtiments, mais aussi pour les aménagements de voirie. Cela permettra de disposer de données à jour en avance de phase. Nous anticipons aussi une autorisation de survol par drones professionnels, ce qui permet d'envisager aujourd'hui : une hybridation des acquisitions avec un (ou des) drones asservis au véhicule de cartographie mobile, ou un drone de type « aile volante » plus lourd doté d'une plus forte autonomie, permettant ainsi des survols nombreux sur les zones cartographiées.

8.3 A MOYEN TERME

L'IGN industrialisera un système de détection de changement multisources afin de servir l'ensemble de la sphère de l'information géographique.

Proposer un système de production prototypique de données 3D urbaines. À l'instar du véhicule Stéréopolis, l'IGN proposera un tel service d'acquisition.

Certains événements majeurs seront l'occasion de prototyper un certain nombre de technologies dont l'industrialisation pourrait être assurée par les industriels.

En matière de recherche et d'innovation, dans le contexte de l'ISITE FUTURE, contribuer à la coconstruction d'une plateforme d'acquisition de traitement et de diffusion de données de recherche sur la ville, qu'elles soient géographiques ou non, et y pousser des données, méthodes et technologies issues des sciences géographiques.

8.4 A COURT TERME

A court terme il convient d'entretenir les partenariats d'échange de données et services, ainsi que l'innovation technologique collaborative (par exemple Lyon, Lille et Strasbourg), où le partenaire exprime des besoins et l'IGN y répond en cohérence avec les objectifs à terme. En matière de recherche, il faut poursuivre et renforcer l'intégration avec les acteurs de l'ISITE, en particulier le couplage des sciences non géographiques et des sciences géographiques. Il faut également susciter le démarrage d'une plateforme coconstruite dans le cadre de l'ISITE FUTURE, en construisant un jumeau numérique géographique de l'ISITE, englobant le périmètre de la station de RER de Champs-sur-Marne. Le démarrage d'outils de saisie LOD3 sur la base de catalogues de modèles est explicité dans la section. La capitalisation



d'outils de recherche permettant d'assister fortement la saisie sera démarrée en 2020 (l'étude est en cours).

9. VEHICULE AUTONOME

9.1 GENERALITES ET POSITIONNEMENT DE L'INSTITUT

L'Institut est un acteur public majeur de la stratégie nationale pour le véhicule automatisé, pilotée par la direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM). La cartographie haute définition, appelée « Cartographie HD » est un bien commun à construire. La Cartographie HD pour le VA est à la fois jugée nécessaire, et en même temps un point faible (cf. assises de la mobilité). Face à la méconnaissance du rôle de la cartographie HD dans ce système global (au minimum européen), l'action de l'Institut doit être centrée dans un premier temps sur les questions de position du VA. À défaut de spécifications disponibles pour une utilisation *in fine*, l'Institut a opté pour une conception et une production expérimentale partiellement itérative.

Selon les résultats des expérimentations qui utiliseront la cartographie produite et leur pertinence, l'IGN pourra participer à la conception et la réalisation d'une couche cartographique spécifique, et de son système d'hébergement, comprenant les aspects de collecte des données, de modélisation, de qualification, et de mise à disposition. Concernant les véhicules proprement dits, il est attendu que l'Institut participe à leur homologation, contexte dans lequel nous anticipons qu'il mettra à disposition ses compétences en matière de localisation, pour qualifier l'écart entre la position (et éventuellement l'orientation) du VA par rapport à sa position estimée.

La perte certaine de certains signaux GNSS et les dérives des INS dans les milieux urbains denses nécessitent de caler le VA sur la base d'objets visibles et mesurables du contexte local. Les *amers visuels* dont il est question pour cela devront être précis (géométriquement, vraisemblablement d'un bon niveau de détail également), et identifiables (donc peut-être flanqués d'images). L'apport des objets connectés sera non négligeable pour « tenir » [recaler] le VA dans son périmètre de déplacement, en particulier dans les milieux confinés.

À ce stade, il n'est pas envisagé que l'IGN doive se positionner comme pilote de la mise en place d'un système commun à tous les constructeurs automobiles, mais y contribuer en tant que représentant garant des prérogatives de politiques publiques, lequel système permettra les échanges en temps réel entre les VA, les infrastructures, les plateformes des gestionnaires, voire des industriels, et ce afin d'échanger les données les plus critiques localement (événements fugaces de type accident, feu en panne, bouchon, arrivée des secours [dont il faut faciliter le déplacement]...). En revanche, si des technologies de l'IGN intéressent des partenaires sur cette thématique, leur valorisation sera menée sous forme d'appui, d'expertise,

d'expérimentation par exemple. Ainsi, des technologies de croisement de données LIDAR permettant de corroborer des hypothèses de changement du terrain pourront être proposées, ou des méthodes de détermination de la position à partir d'images obtenues par les caméras des véhicules, ou des hybridations des deux.

9.2 A LONG TERME

Lorsque la Cartographie HD sera spécifiée et mise en œuvre, et selon les recommandations nationales et supranationales qui s'imposeront, l'IGN pourra se voir confier les missions suivantes.

Certification de la Cartographie HD

L'IGN pourra participer à la certification de la Cartographie HD en tant que sous-système du système global d'automatisation. Sur le plan de la structure de la base de données, cela relève de la standardisation et de l'ingénierie. Un point d'attention particulier est porté sur le caractère hybride de cette base. Elle sera en effet peut-être un mélange de données vecteur et raster.

Mise à jour de la Cartographie HD

Les VA eux-mêmes, s'ils sont à terme en mesure de détecter des incohérences entre la Cartographie HD et le terrain (par corroboration de mesures multiples) pourront fournir des mises à jour. Ces protocoles seront l'objet de standardisation, de qualification et d'intégration dans la base, avant diffusion en temps réel.

Dans tous les cas, des collectivités elles-mêmes sont en mesure de fournir des données de mise à jour (cf. chapitre 8). L'Institut, dans une fonction de fédérateur et d'agrégateur, pourra transmettre les données, après harmonisation (dont qualification), au système hébergeant la Cartographie HD, que ce système soit géré par l'IGN lui-même ou non.

Il est vraisemblable que les données parviendront à l'Institut en anticipation d'événements à venir, dès lors que les travaux réellement menés feront l'objet de transmission préalable des données anticipées après les travaux (refonte de signalisation verticale et horizontale, trottoirs, changement de sens de circulation). Le contexte réglementaire actuel n'oblige pas la mise à disposition des données d'anticipation, mais il est probable, dans ce contexte, qu'il l'oblige à terme.

Homologation des VA

Le positionnement pressenti de l'Institut pour l'homologation du VA concernera la détermination la plus précise possible de la position du VA par tous moyens (caméras photogrammétriques, drones...). La position (et l'orientation) du VA estimée par lui-même devra certainement respecter des critères d'homologation, typiquement l'écart longitudinal et transversal à la trajectoire prévue. L'Institut

proposera des systèmes de mesure de ces valeurs, afin de qualifier la performance du VA sur ces deux aspects au moins.

9.3 A MOYEN TERME

Pour la **définition des exigences auxquelles devra répondre la Cartographie HD**, les contributions progressives (par itérations successives) à la spécification des données (nature, modélisation, précisions, exhaustivité, actualité) s'appuieront sur des productions prototypiques dans des conditions de plus en plus complexes.

Pour y répondre, et proposer à des partenaires des technologies dont ils pourraient se servir pour les mêmes objectifs, il convient d'optimiser l'outillage de production de saisie d'objets 3D simple et efficace. L'objet n'est pas d'industrialiser par les moyens propres de l'IGN ce type d'outil, mais de parvenir à un outil de production prototypique pour les différentes productions en appui de la conception de la cartographie HD. Les amers visuels, quant à eux, feront l'objet de saisies en 3D les plus précises possible. Leur modélisation géométrique sera l'objet de modélisation complète, basée sur des modèles de saisie adaptée (« structurée » ou « procédurale ») quitte à ce qu'elle soit simplifiée en fonction des besoins et de la capacité de reconnaissance des VA. L'équipement de la voirie en objets connectés passif, en milieu particulier (milieux confinés, zones où la cartographie HD n'est pas à jour ou pas produite, ou éventuellement insuffisante), sera menée de manière prototypique et en partenariat.

9.4 A COURT TERME

À court terme, l'optimisation de production d'amers visuels est abordée par la saisie structurée (cf. section 6.5). Cette saisie structurée relevant a priori de l'ingénierie doit être renforcée par des technologies de la recherche, afin de caler les modèles le plus efficacement possible. La valorisation de certains outils issus de la recherche doit être entamée.