



HAL
open science

Identification de zones d'implantation potentielle de projets photovoltaïques à partir d'un système d'information géographique et d'une analyse multi-critère

Tom Godichon

► **To cite this version:**

Tom Godichon. Identification de zones d'implantation potentielle de projets photovoltaïques à partir d'un système d'information géographique et d'une analyse multi-critère. Géographie. 2023. dumas-04222243

HAL Id: dumas-04222243

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04222243>

Submitted on 29 Sep 2023

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

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

MASTER Domaine : **SHS**

Mention : **GAED** (Géographie, Aménagement, Environnement, Développement)

Parcours **GÉOÏDES** (Géographie, Information, Interface, Durabilité, Environnements)

Identification de zones d'implantation potentielle de projets photovoltaïques à partir d'un système d'information géographique et d'une analyse multi-critère

Réalisé à QENERGY France du 27 février 2023 au 25 août 2023

Mémoire soutenu le : 27/06/2023

Par : **Tom GODICHON**

Devant un jury constitué de :

Directrice de mémoire : Mme. Sarah DUCHÉ

Examineur : Mme. Dominique BAUD

Année universitaire 2022-23

Résumé

Pour répondre au contexte actuel de bouleversements climatiques, le gouvernement français s'est engagé à réduire ses émissions de CO₂, pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Une des pistes explorées pour y parvenir est la reconstruction du mix énergétique, avec le développement massif des énergies renouvelables. La priorité a été donnée aux centrales solaires photovoltaïques, dont le déploiement a pris du retard dans les années 2010. Pour les entreprises en charge du développement de projets solaires, faisant face à une forte concurrence, l'objectif est d'identifier des zones d'implantation potentielle (ZIP) le plus rapidement possible.

Des méthodes de prospection ont été proposées, pour différentes sources d'énergies renouvelables (solaire, hydroélectricité, éolien). Une méthodologie fréquemment utilisée est la combinaison des systèmes d'informations géographiques (SIG) et de l'analyse multicritères (AMC). Elle s'appuie sur la dimension spatiale des SIG, et sur l'aide à la décision que peut apporter l'AMC. Cependant, la législation sur les énergies renouvelables évolue rapidement, et les derniers exemples de prospection SIG – AMC pour le solaire photovoltaïque datent du début des années 2010. De nouvelles contraintes, et spécificités, se sont ajoutées. La méthodologie de prospection de ZIP peut donc être mise à jour. Au long de ce mémoire, nous appliquerons la méthodologie SIG – AMC afin de répondre à la question suivante : existe-t-il des terrains agricoles potentiels pour implanter des projets photovoltaïques en Haute-Garonne ?

La méthodologie se décompose en trois parties. Dans un premier temps, l'objectif sera d'identifier les parcelles agricoles répondant aux critères imposés par l'Etat. Puis nous ajouterons les contraintes fixées par l'entreprise, afin d'obtenir la localisation des ZIP. Enfin, nous proposerons une hiérarchisation de ces terrains, en fonction de contraintes techniques identifiées (relief, distances).

Les premiers résultats montrent que les sites identifiés sont effectivement favorables au développement de centrales solaires photovoltaïques. Les 3 sites les plus favorables d'après l'AMC remplissent tous les critères.

Cependant, certaines limites subsistent : le nombre de critères utilisés pour l'AMC pourraient être augmentés, et certaines données ne sont pas intégrables à un SIG (volontés politiques, relations entre élus et propriétaires).

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement M. Clément Delahaye, chargé de nouveaux projets et territoires à l'agence de Toulouse, mon tuteur de stage. Je le remercie de sa confiance, et de m'avoir offert l'opportunité de mettre en pratique, et de développer mes connaissances et mes compétences en travaillant sur des projets passionnants. Il m'a permis, grâce à son expertise et son engagement, de comprendre et de me sentir à l'aise avec mes missions, et de mener à bien ce stage.

Je remercie M. Jean Labaste, responsable régional de l'agence de Toulouse, pour la confiance qu'il m'a accordée.

Mes remerciements vont également à l'ensemble de mes collègues, de l'agence de Toulouse et d'ailleurs, pour leur accueil bienveillant et leur disponibilité sans faille. Ils m'ont permis de m'intégrer aisément à l'équipe, et de gagner rapidement en autonomie grâce à leurs conseils avisés. Je tiens particulièrement à saluer Victor et Léa, qui furent de redoutables adversaires lors des belotes du midi face au stagiaire et son maître de stage, et qui ont embelli une ambiance de travail déjà très chaleureuse et stimulante.

Plus généralement, je témoigne ma reconnaissance à QENERGY France pour m'avoir donné la possibilité d'observer de près le fonctionnement d'une entreprise de cette envergure, innovante dans le domaine des énergies renouvelables, et de comprendre les défis auxquels elle est confrontée. Cette expérience m'a permis de découvrir l'univers des énergies renouvelables, plus particulièrement celui du solaire, et de me projeter sur ma future carrière professionnelle.

Je tiens également à remercier ma directrice de mémoire, Mme. Sarah Duché, pour sa disponibilité et ses conseils et remarques, qui m'a accompagnée tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis, sur qui j'ai toujours pu compter, même lorsque la distance nous a séparés. Leur soutien indéfectible a été une source inépuisable de motivation et d'énergie, de Grenoble à Toulouse.

Sommaire

Résumé.....	ii
Remerciements.....	iii
Sommaire.....	iv
Sigles et acronymes.....	v
Introduction.....	1
1. État de l'art.....	5
2. Données et méthodologie.....	14
3. Résultats.....	29
Conclusion, limites et perspectives.....	34
Références bibliographiques.....	36
Liste des tables.....	38
Table des matières.....	39
Annexes.....	40

Sigles et acronymes

COP : Conférence des Parties

CDN : Contributions Déterminées au niveau National

GES : Gaz à effet de serre

UE : Union Européenne

PPE : Programmation pluriannuelle de l'énergie

EnR : Énergie renouvelable

AAI : Autorités Administratives françaises Indépendantes

CSPE : Contribution au Service Public de l'Électricité

AO PPE2 PV Sol : Appels d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire au sol

CENPT : Chargé d'études nouveaux projets et territoires

SIG : Système d'information géographique

CRE : Commission de régulation de l'énergie

ZIP : Zone d'implantation potentielle

SNBC : Stratégie nationale bas carbone

RTE : Réseau de transport de l'électricité

MNT : Modèle numérique de terrain

IGN : Institut Géographique National

RGE : Référentiel à grande échelle

PAC : Politique agricole commune

RPG : Registre parcellaire graphique

ASP : Agence de services de paiements

EPCI : Etablissement publics de coopération intercommunale

CC : Communauté de commune

CA : Communauté d'agglomération

CU : Communauté urbaine

DREAL : Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

PICTO : Portail Interministériel de la Connaissance du Territoire en Occitanie

BT : Basse tension

HT : Haute tension

PLU(i) : Plan Local d'Urbanisme (Intercommunal)

ISDD : Installation de stockage de déchets dangereux

PPH : Prairie permanente - herbe prédominante (ressources fourragères ligneuses absentes ou peu présentes)

PRL : Prairie en rotation longue (6 ans ou plus)

SPH : Surface pastorale - herbe prédominante et ressources fourragères ligneuses présentes

J6P : Jachère de 6 ans ou plus (surfaces gelées sans production)

J6S : Jachère de 6 ans ou plus déclarée comme surface d'intérêt écologique

CDPENAF : Commission départementale de préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers

RC : Ratio de cohérence

Introduction

1.1.Contexte

La signature de l'accord de Paris lors de la COP21, le 12 décembre 2015, a marqué une accélération de l'engagement des parties signataires dans la lutte contre le changement climatique. Il est devenu le premier accord universel sur le climat, signé par 194 parties, avec pour objectif commun de limiter le réchauffement climatique en dessous de 2°C. Pour parvenir à atteindre cet objectif, quatre principes majeurs ont été décrétés (Nations Unies 2015) :

- Les États fixent eux-mêmes leurs engagements, sur la base du volontariat et sans contraintes, via les Contributions Déterminées au niveau National (CDN) ;
- Les CDN sont révisées puis publiées tous les 5 ans ;
- Les pays développés doivent soutenir les pays en développement à financer des projets de lutte contre le changement climatique et à s'adapter aux impacts du changement climatique ;
- Les pays doivent travailler ensemble pour renforcer leur résilience face aux impacts du changement climatique et réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans tous les secteurs, notamment l'énergie.

La France, par la signature de l'Union Européenne (UE), s'est engagée à contribuer aux objectifs de l'accord de Paris. Pour y répondre, l'État français s'est fixé comme objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, suite à la loi n°2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat, nommée Loi Énergie-Climat. La neutralité carbone, ou zéro émission nette, est la situation où les quantités de gaz à effet de serre émises sont entièrement compensées par les quantités stockées. Pour l'atteindre, il est donc nécessaire de réduire les émissions, et parallèlement développer les puits de carbone. Ainsi, cette loi repose sur quatre piliers, dont la sortie progressive des énergies fossiles, compensée par le développement des énergies renouvelables (EnR).

Créée par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) donne la stratégie de l'État sur le sujet de l'énergie. Elle est établie sur des périodes de 10 ans, et réactualisée tous les 5 ans. Parmi les thématiques abordées, on retrouve le développement de l'exploitation des énergies renouvelables (EnR). La dernière PPE a été établie en 2019, et est en cours de révision cette année. Un des axes stratégiques de la PPE est de « diversifier les mix énergétiques en favorisant la pénétration des énergies renouvelables ». L'objectif est de doubler la capacité installée des énergies renouvelables d'ici 2028, pour atteindre une capacité d'environ 100 à 110 GW. De toutes les filières EnR, c'est le solaire photovoltaïque qui devrait bénéficier du développement le plus important, jugée comme la technologie « la plus compétitive ». Plus précisément, ce sont les grandes centrales au sol qui progresseront, à la fois dans leur nombre et dans leur taille, avec des projets plus nombreux et plus grands (Ministère de la transition écologique et solidaire, avril 2020).

La Commission de Régulation de l'Énergie est une des 17 Autorités Administratives françaises Indépendantes (AAI), et a été créée en 2000 par la loi n°2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité. Comme chaque AAI, la CRE a pour objectif de réguler un marché, ici celui de l'électricité et du gaz. Pour y parvenir, elle a la charge de plusieurs missions, notamment celle de fixer plusieurs tarifs, et en particulier

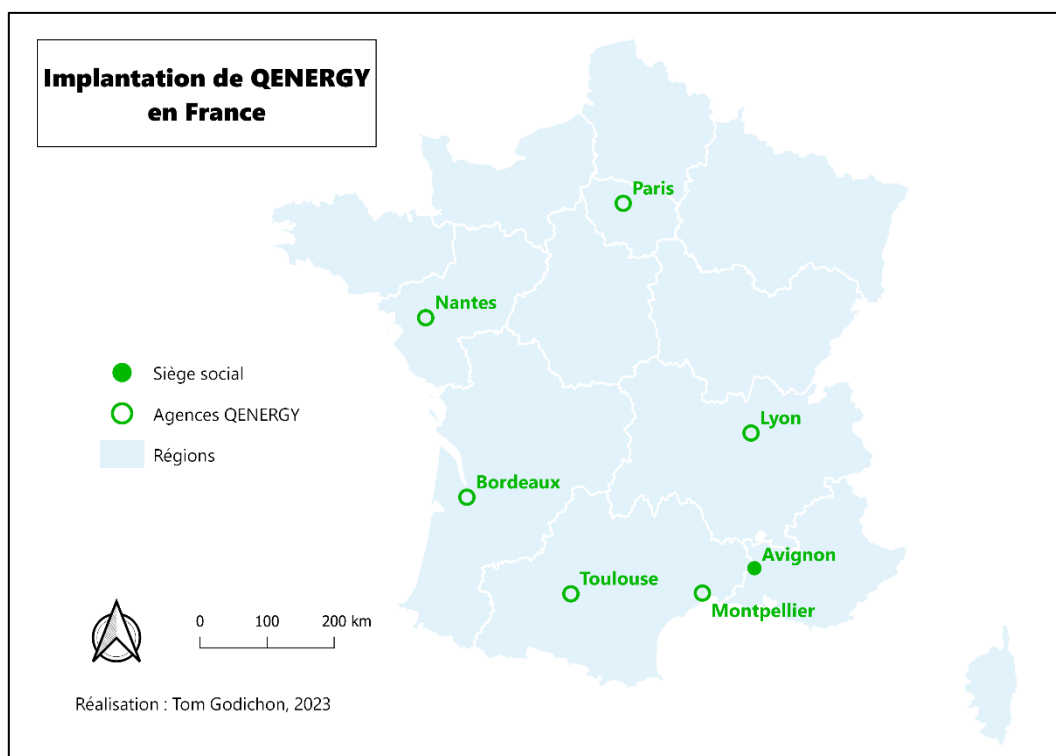
celui de la Contribution au Service Public de l'Électricité – CSPE (CRE 2021). Ainsi, 69% des fonds récoltés par cette taxe permettent de soutenir le financement de projets de développement d'énergies renouvelables, dont 32% pour le solaire. Ce financement se fait à travers des deux « appels d'offres annuels portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire au sol », dits AO PPE2 PV Sol, et se caractérise par un contrat de rachat de l'électricité produite, à des tarifs fixes et très attractifs, assurant donc une sécurité financière aux développeurs (CRE 2022).

Aujourd'hui, le marché du solaire photovoltaïque au sol est très porteur en France, ce qui explique la multiplication des bureaux d'études spécialisés dans le développement de projets EnR (Observ'ER 2022). C'est le cas de QENERGY France

1.2. Présentation de QENERGY France

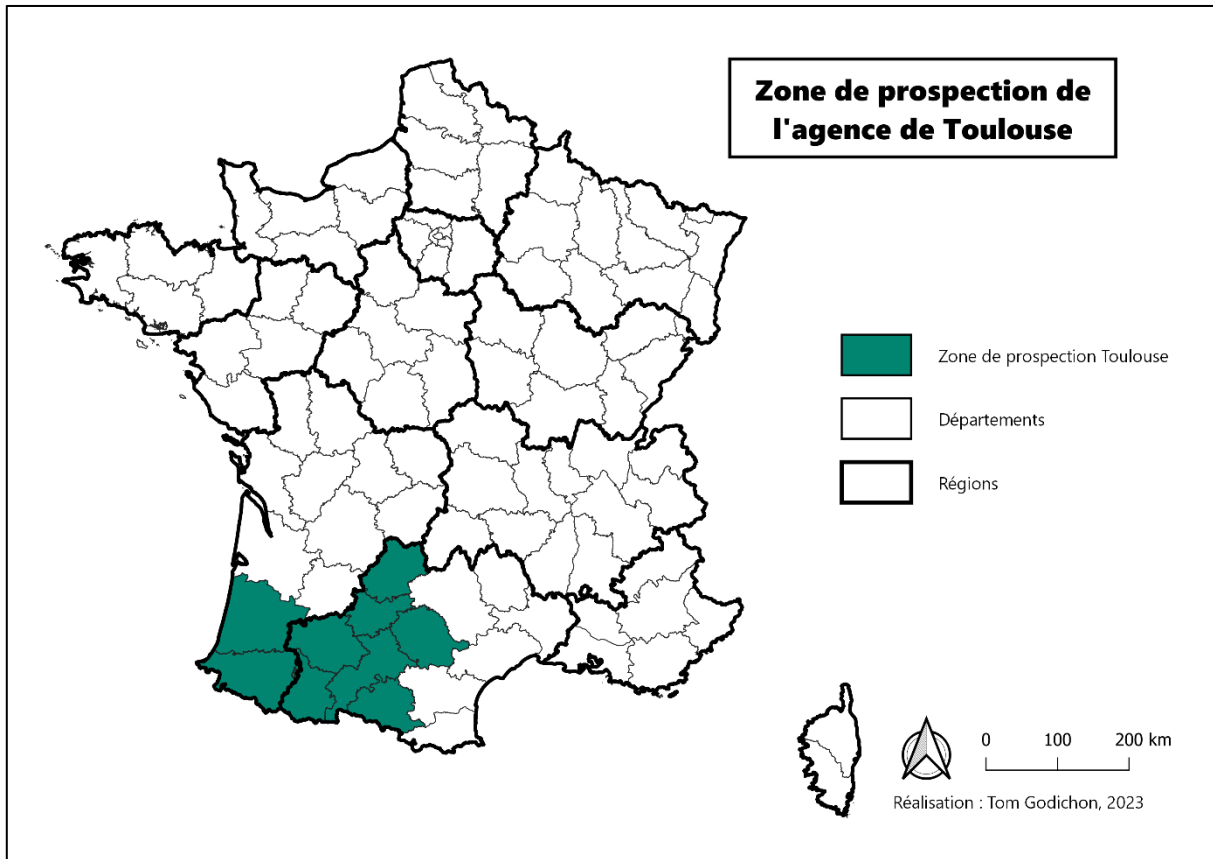
Présente en France depuis 24 ans, QENERGY France compte aujourd'hui 1.9 GW de projets développés, et 5.6 GW de projets en développement, répartis entre les agences sur l'ensemble du territoire métropolitain. En effet, l'entreprise originaire d'Avignon s'est progressivement étendue avec l'ouverture de 6 agences à Paris, Nantes, Bordeaux, Toulouse, Montpellier et Lyon (figure 1).

Figure 1 : Implantation de QENERGY en France
© Tom Godichon, 2023



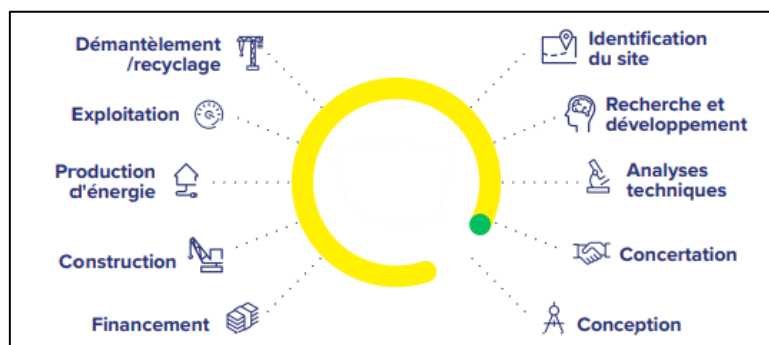
L'agence de Toulouse est dédiée au développement de projets solaires, sur un territoire composé de 9 départements, répartis sur 2 régions (figure 2) : en Nouvelle-Aquitaine, elle a la charge du développement des projets dans les départements des Landes et des Pyrénées-Atlantiques. En Occitanie, elle s'occupe du développement dans les 7 départements les plus à l'ouest (Ariège, Haute-Garonne, Gers, Lot, Hautes-Pyrénées, Tarn et Tarn-et-Garonne).

Figure 2 : Zone de prospection de l'agence de Toulouse
© Tom Godichon, 2023



L'énergie solaire est un des axes de développement de l'entreprise, avec des projets photovoltaïques au sol, flottants, d'ombrières ou agrivoltaïques. L'entreprise est présente lors de l'ensemble des phases du projet et de l'exploitation du parc (figure 3).

Figure 3 : Ensemble des phases d'un projet
© Tom Godichon, 2023



La phase d'identification du site est la première à intervenir dans le processus, et est nommée P0. La qualité et la précision du choix d'un site est très importante pour un projet, puisque l'ensemble du développement qui en découle se retrouve impacté.

Or, l'agence de Toulouse, comme les autres agences de QENERGY France, est au cœur d'une course contre-la-montre pour identifier et sécuriser de nouveaux terrains, qui se raréfient, et doit faire face à une forte concurrence. En effet, la phase de prospection est l'unique moment pour l'entreprise de gagner du temps face à ses concurrents, puisque les autres phases dépendent de l'administration (permis de construire, enquête publique) ou de partenaires extérieurs (suivis naturalistes).

Chez QENERGY France, la mission de prospection et d'identification des sites est réalisée par un Chargé d'Études Nouveaux Projets et Territoires (CENPT), poste créé en mai 2022. Les objectifs sont multiples : prospection de sites, dérisquage et identification des propriétaires. Cependant, la nouveauté de ce poste et son déploiement sur l'ensemble des agences sur une courte période n'ont pas encore permis de déterminer une méthodologie de prospection propre à l'ensemble de l'entreprise. Chaque CENPT a sa façon de travailler, avec des outils différents (QGIS, QMAPS – le logiciel SIG interne à QENERGY, ou autre).

On en arrive donc aux constats suivants :

- Une volonté politique de développement des énergies renouvelables, avec le solaire photovoltaïque comme pilier ;
- Une urgence de trouver de nouvelles zones d'implantations ;
- Un besoin d'efficacité en phase de prospection pour gagner du temps ;
- Une méthodologie non définie à l'échelle du groupe due à la création très récente du poste de CENPT, poste par ailleurs absent à l'agence de Toulouse.

Face à tous ces enjeux, l'utilisation de systèmes d'information géographique semble être une réponse adaptée. En effet, ces derniers permettent d'analyser et de combiner les données géographiques nécessaires à la phase de prospection, et pourraient ainsi permettre d'obtenir une cartographie hiérarchisée des différentes zones d'implantation potentielles.

Face à la demande croissante de nouvelles zones d'implantation, le manque de méthodologie de prospection au sein de QENERGY, et l'apport potentiel des SIG, la question suivante mérite d'être soulevée :

Existe-t-il des terrains agricoles potentiels pour implanter des projets solaires photovoltaïques en Haute-Garonne ?

L'objectif sera de proposer une méthodologie de prospection complète, à partir d'un SIG (QGIS), afin d'identifier des zones d'implantation potentielles. Cette méthodologie devra prendre en compte un ensemble de critères à respecter, et aboutir sur une hiérarchisation des différents sites retenus.

Pour ce faire, nous analyserons d'abord la zone de prospection de l'agence de Toulouse au regard des critères imposés par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), puis en fonction de la stratégie de l'entreprise pour déterminer les zones d'implantation potentielles. Une dernière phase permettra de hiérarchiser les ZIP, avant de présenter les résultats.

1. État de l'art

1.1. La place du solaire photovoltaïque dans le mix énergétique français

Délaisser les énergies fossiles est un défi majeur à relever pour la France, puisqu'elles sont à la base du développement économique et social du pays depuis la révolution industrielle au XVIII^{ème} siècle. Aujourd'hui, 61% de l'énergie utilisée en France est d'origine fossile. En effet, 40% de l'énergie utilisée provient des produits pétroliers, 20% de gaz naturels et 1% du charbon. Les combustibles fossiles permettent ainsi de répondre à une demande de 930 TWh/an, contre 430 TWh/an pour l'électricité. Cependant, la France est un cas particulier dans le domaine de l'énergie. En effet, elle dispose du deuxième plus grand parc nucléaire au monde, derrière les États-Unis. Il est composé de 56 réacteurs, dont la majorité ont été construits entre les années 1970 et 1990. D'abord développés pour répondre aux chocs pétroliers de 1973 et 1979 en gagnant en indépendance, ces réacteurs, ajoutés à une production hydraulique déjà bien développée, ont permis à la France de produire en grande quantité une électricité décarbonée. Le nucléaire représente aujourd'hui 70% de l'électricité produite sur le territoire, mais reste une technologie contestée, qui n'apporte que 20% de l'énergie finale utilisée. Ces deux chiffres témoignent de la dépendance de la France aux énergies fossiles, importées, et donc du défi à relever pour approcher la neutralité carbone.

La stratégie française de sortie des énergies fossiles est définie par la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC). Sa dernière version a été publiée en 2020, et préconise les changements suivants : d'une part, une réduction de la consommation d'énergie de 40% sur 30 ans, qui équivaldrait à revenir à la consommation dans les années 1960. D'autre part, une offre en électricité territoriale décarbonée, excluant donc les importations, pour créer un système neutre en carbone et souverain (Ministère de la transition écologique et solidaire, mars 2020).

Cette stratégie a été analysée par le gestionnaire de réseau de transport de l'électricité en France (RTE). L'étude « Futurs énergétiques 2050 » a pour objectif de tester la mise en pratique de la SNBC à travers plusieurs scénarios, à partir d'une consommation d'électricité annuelle de 645 TWh (RTE, février 2022). Aujourd'hui, la France produit 500 TWh/an d'électricité décarbonée, ce qui la place largement en tête des pays européens (300 pour l'Allemagne et 100 pour l'Italie, qui ont des objectifs de production pour 2050 équivalents à ceux français). Cependant, le vieillissement du parc nucléaire menace cette production. Les réacteurs sont en fonctionnement depuis 36 ans en moyenne, et leur échéance avait été prévue 40 ans après leur mise en fonction. Les fermetures de réacteurs en cascade et les longs délais de construction de nouveaux réacteurs obligent à prolonger la durée de vie du parc nucléaire et le développement des EnR pour maintenir la production à moyen terme (2035). À plus long terme, l'arrêt des réacteurs nucléaires forcera la stratégie de production d'électricité à se renouveler, puisque le nucléaire produit aujourd'hui entre 380 et 400 TWh/an. L'étude Futurs énergétiques 2050 doit donc répondre à la nécessité d'augmenter la capacité de production d'électricité verte, tout en prenant en compte l'inévitable fermeture des réacteurs nucléaires, qui produisent la majorité de l'électricité en France.

Des changements économiques ont été observés lors des deux dernières décennies, avec le développement des parcs nucléaires de 3^{ème} génération, dont les coûts de construction et d'exploitation ont augmenté. À l'inverse, sur la même période, le soutien des États occidentaux

au développement des EnR ont permis de diminuer les coûts de construction. Des changements sociétaux sont également apparus, avec de nouvelles contestations. Si l'opposition au nucléaire reste forte depuis sa mise en place dans les années 70 (risque d'incident, gestion des déchets radioactifs), les controverses touchent aussi les EnR. En effet, des questions environnementales sont régulièrement soulevées (hydraulique et biodiversité, bilan carbone du photovoltaïque), ainsi que des problématiques sociétales (impact paysagers des parcs éoliens) et de rendement (variabilité de la production : sans vent, pas d'énergie éolienne produite etc.). Suite à ces constats, RTE a identifié deux options pour atteindre la neutralité carbone : un mix énergétique alliant développement des EnR et apport du nucléaire, ou un renoncement du nucléaire sur le long terme, s'accompagnant d'une explosion des EnR.

Dans tous les cas, la priorité revient aux EnR, dont les différentes technologies n'ont pas le même potentiel de développement. Les technologies de production d'EnR en France sont les suivantes : bioénergie, hydraulique, éolien (terrestre et en mer) et photovoltaïque.

Les bioénergies correspondent aux centrales thermiques alimentées par des combustibles renouvelables ou de récupération (biomasses, biogaz, déchets). Cette énergie reste marginale dans la production d'électricité en France, avec 2 GW installés, fournissant 2% de la production totale (10 TWh/an). La ressource en biomasse très faible explique le potentiel réduit de cette technique, qui devrait connaître une croissance très ténue dans les décennies à venir.

L'hydraulique a été la première EnR à être déployée sur le territoire, avant même le nucléaire, puisqu'elle apparaît en 1940 lors de l'aménagement du Rhône. C'est aujourd'hui la première source d'EnR en France, avec une capacité installée de 26 GW, produisant 60 TWh/an (15% de la production totale d'électricité). Cependant, malgré l'avantage considérable d'être flexible via les lacs de barrages, son potentiel a déjà été pleinement exploité, et les opportunités de développement sont assez faibles à long terme. Ce potentiel déjà faible est d'autant plus réduit que les conflits sur l'usage et la gestion de l'eau avec les agriculteurs risquent d'augmenter avec l'augmentation de la fréquence et de la durée des sécheresses. Ainsi, RTE prévoit une augmentation de la production de 5 GW (soit 31 GW au total) pour 2050.

L'éolien terrestre est, derrière l'hydraulique, la deuxième force de production d'EnR en France. Avec 8000 éoliennes installées sur le territoire entre les années 90 et 2020, pour une capacité de 18 GW, la production s'élève à 40 TWh aujourd'hui, faisant de la France le 4^{ème} plus gros parc éolien d'Europe. La technologie est considérée comme mature et compétitive, au sens où le rapport entre rendement de production et coûts de construction et d'entretien est positif, avec des prix autour de 60€ le MWh qui continuent de diminuer. Malgré les débats virulents sur la discontinuité de production et l'impact paysager, le développement de l'éolien terrestre en France a suivi un rythme régulier, avec une augmentation de 1 à 1,7 GW/an. RTE prévoit que ce rythme devrait se poursuivre, et pourrait accélérer avec un soutien politique renforcé.

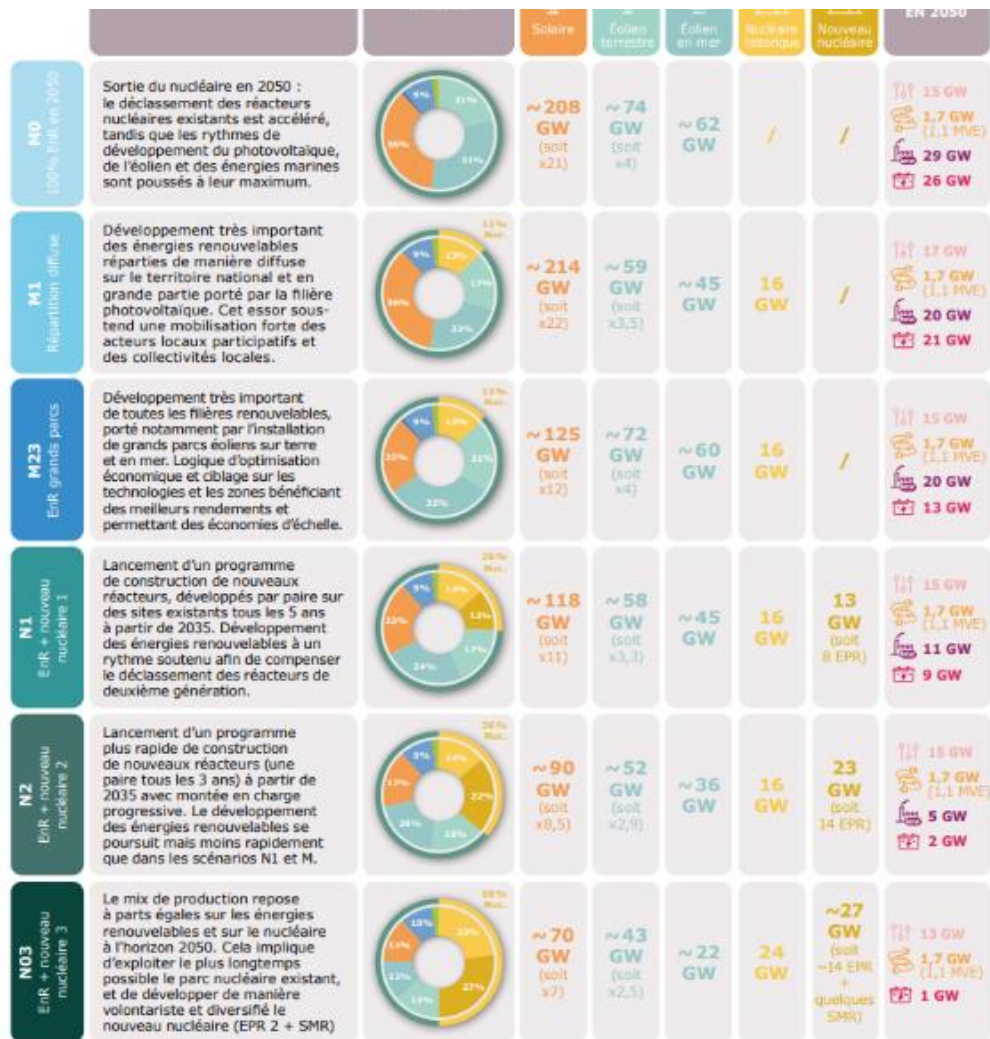
L'éolien en mer est une technologie encore peu développée en Europe, et en particulier en France, où le premier parc, situé en Bretagne, devrait être construit entre 2025 et 2030. Cependant, les perspectives d'évolution montrent une croissance forte à long terme, l'éolien off-shore présentant des conditions plus favorables (vents plus forts et plus constant une fois éloigné des côtes), des coûts qui décroissent rapidement (de 200€/MWh pour les premiers parcs à 44€/MWh aujourd'hui) et une meilleure acceptabilité. Toutefois, quelques inquiétudes subsistent, notamment les conflits d'usages avec le secteur de la pêche et l'impact sur la biodiversité marine. De plus, le territoire français ne semble pas être le plus adapté. Malgré un

littoral de 5500km de long, les côtes Méditerranéenne et Atlantique plongent rapidement en profondeur, contraignant le développement de l'éolien en mer sous forme de parcs flottants, donc les coûts sont nettement plus élevés.

Enfin, le solaire photovoltaïque devrait constituer l'axe de développement prioritaire de la politique énergétique. En effet, la France accuse un fort retard sur le déploiement du solaire par rapport à ses voisins européens, la faute à un virage mal négocié au début des années 2010. Les tarifs de rachat sont alors disproportionnés avec la réalité du terrain, provoquant formation, puis l'explosion, d'une bulle spéculative. La baisse des coûts très importante au cours de la dernière décennie (industrialisation de la fabrication de panneaux contribuant à une économie d'échelle), ainsi que l'arrivée à maturité de la technologie, doivent permettre à la France de combler son retard. Le terreau politique et social semble fertile, avec un soutien fort des collectivités territoriales, et une haute acceptabilité de la population, qui plébiscite un impact paysager plus faible comparé à l'éolien. Cependant, le développement massif du solaire photovoltaïque s'accompagne de problématiques à gérer, notamment celle de l'emprise au sol, dans un contexte d'expansion des aires urbaines, et de volonté de préserver les espaces à hautes valeurs agricoles et écologiques.

Pour proposer un mix énergétique cohérent avec la SNBC, RTE a donc misé sur plusieurs scénarios, en fonction du développement de chacune des technologies présentées précédemment. 6 scénarios ont été retenus, la moitié basée sur un mix nucléaire / EnR, et l'autre moitié en 100% EnR (figure 4).

Figure 4 : Les scénarios de mix de production à l'horizon 2050 en France
© RTE, 2021



Il est intéressant de noter que, quel que soit le scénario retenu, la part du nucléaire diminue au profit des EnR, tandis que la production solaire est toujours celle qui bénéficie de l'augmentation la plus importante (x7 dans le pire des scénarios, et jusqu'à x21 dans le cas d'une sortie du nucléaire en 2050). L'essor massif à venir du solaire photovoltaïque offre de belles perspectives économiques, dans un marché au sein duquel la concurrence sera de plus en plus forte. Mais cette opportunité ne doit pas se faire au détriment des consommateurs.

1.2. La technologie du solaire photovoltaïque : aspects techniques

Lorsqu'on s'intéresse à la prospection solaire, une connaissance du fonctionnement de la technologie peut être un avantage. En effet, les centrales solaires au sol ont des contraintes lors des phases de construction, qu'il est important d'identifier avant de démarrer un projet.

Une centrale solaire s'articule autour de 7 composants :

- Les panneaux photovoltaïques ;

- Les structures métalliques de support ;
- Les onduleurs / transformateurs ;
- La structure de livraison ;
- Les réseaux de câbles ;
- Les routes et pistes d'accès.

Les panneaux (ou modules) photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Un module convertit ainsi une partie de l'énergie solaire qu'il reçoit en courant électrique continu à faible tension.

Les structures doivent supporter la charge statique du poids des modules et, selon l'inclinaison et la zone géographique d'implantation, une surcharge de vent, neige et glace.

Une garde au sol d'un minimum de 0,4 m permet de faciliter l'entretien du site et éventuellement à la petite faune de circuler librement. Cette garde au sol permet également de laisser passer la lumière du soleil sous les modules (développement de la végétation). En général, la hauteur des panneaux ne dépasse pas 2,5m, avant tout pour des raisons d'intégration paysagère.

Les panneaux photovoltaïques sont montés en série sur les structures, orientées plein Sud et avec une inclinaison de l'ordre de 20°. Cette inclinaison varie en fonction de la latitude, et augmente au fur et à mesure qu'on se rapproche des pôles.

Les onduleurs transforment le courant continu produit par les modules en courant alternatif. Les transformateurs élèvent la tension en sortie des onduleurs à une tension acceptable par le réseau (20kV).

L'accès aux sites se fait par le réseau routier départemental et communal. Cependant, l'acheminement de tous les composants requiert une proximité avec les grands axes routiers (autoroutes, routes nationales).

Afin d'identifier l'ensemble des contraintes spatiales imposées par les panneaux solaires, l'analyse du territoire par SIG peut paraître comme une solution adaptée.

1.3. Les SIG et la prospection

Les premiers systèmes d'information géographique sont apparus dans les 1960, puis ont vu leur utilisation se démocratiser dans de nombreux domaines au fur et à mesure des progrès techniques : urbanisme, études socio-économiques, aménagement du territoire, environnement...

S'il existe une multitude de définition des SIG, c'est aujourd'hui celle de Chrisman qui fait consensus : « A system of hardware, software, data, people, organizations and institutional arrangements for collecting, storing, analyzing, and disseminating about areas of the earth » (Chrisman, 2002). Ainsi, il est attendu d'un SIG qu'il puisse remplir les fonctions suivantes :

- Acquérir des données
- Stocker des données
- Analyser des données
- Afficher des données

Pour différencier les SIG des simples logiciels de cartographies, trois spécificités sont identifiées (Foote et Lynch, 1996) :

- La gestion de données géographiques, c'est-à-dire de données ayant une référence spatiale : si d'autres logiciels peuvent contenir des données spatiales (adresses), les SIG sont basés sur la dimension spatiale des données, qui permet ensuite d'accéder à plus de données (Donnay, 2005)
- L'intégration des données multiples : les SIG peuvent combiner données issues de sources différentes
- L'aide à la prise de décision. Comme le démontrent Cowen (1988) et Grimshaw (1994), l'ensemble des fonctions listées précédemment ont un objectif principal : soutenir la prise de décision

Pour aider à la décision, les SIG permettent d'effectuer l'analyse des données spatiales. Ces analyses sont continuellement améliorées et diversifiées avec les progrès technologiques, si bien qu'une classification des analyses possibles a été réalisée par Chrisman en 2002. Il distingue 6 possibilités d'analyse :

- Les analyses descriptives : les opérations qui ne nécessitent pas de modifier la composante spatiale, mais uniquement les attributs des entités (agrégation, classification...)
- La superposition de couche : afficher les entités ayant des caractéristiques spatiales communes
- Les opérations métriques, regroupant l'ensemble des opérations liées à la distance
- Les opérations sur les surfaces, permettant la description continue d'une portion de l'espace (altitude, pente, température...)
- Les opérations avancées
- Les opérations de transformation

Cependant, des limites ont été identifiées quant à l'utilisation des SIG pour l'aide à la prise de décision dans la littérature (Malczewski, 2004). Une des limites principales est la prise en compte des aspects multicritères dans les prises de décision, puisque les SIG ne sont pas capables de prendre en compte les critères antagoniques. Dans le cadre d'une analyse spatiale de plusieurs critères, un SIG analyse les critères les uns après les autres, mais pas tous entre eux, et avec une égale importance. On obtient ainsi la ou les solutions répondant à tous les critères, mais pas la meilleure solution pour le décideur.

Les SIG sont donc insuffisants pour l'aide à la décision dans le cas de problèmes multicritères. Pour compenser ces manquements, l'AMCD peut être une solution efficace.

L'AMCD est un processus ayant pour objectif d'analyser un problème complexe, n'ayant pas de solution objective (Roy, 1990). Pour cela, elle décompose le problème en plusieurs critères, qui sont chacun évalués par rapport aux autres dans un modèle de préférence. En prenant en compte l'importance de chaque critère, l'AMC permet de proposer le meilleur compromis, en le présentant de 4 manières possibles (Roy, 1985) :

- Le choix : sélection de la meilleure option possible, au détriment de toutes les autres
- Le tri : donner, pour chaque zone, la meilleure option
- Le rangement : classement des options de la meilleure à la moins bonne
- La description : décrire toutes les options sans les hiérarchiser

Cependant, l'AMC seule ne peut pas prendre en compte l'ensemble des aspects d'une prise de décision spatiale, puisqu'elle éclipse la dimension spatiale du problème (Chakhar 2006).

D'une part, nous avons donc les SIG, qui permettent d'observer la complexité des problèmes spatiaux, mais qui sont incapables de prendre en compte l'aspect multicritère de ces problèmes. De l'autre, nous avons l'AMCD, qui est adaptée pour l'analyse multicritères des problèmes spatiaux, mais qui trouve ses limites dans la représentation spatiale de ces problèmes.

Il faut donc pouvoir combiner les SIG et l'AMC, en utilisant les points forts de chacun pour combler les faiblesses de l'autre.

On retrouve la volonté d'intégrer SIG et AMC dès 1990, appliquée à la thématique agricole aux Pays-Bas (Janssen et Rietveld, 1990). L'application de la combinaison SIG-AMC aux problématiques de prospection d'énergies renouvelables apparaît en 2009 pour l'énergie marémotrice (Nobre et. al., janvier 2009), puis est reprise en 2011 pour l'énergie éolienne (Vazquez et De Lourdes, octobre 2011). Concernant l'énergie solaire, une étude a été menée en 2009 dans le PNR du Haut-Languedoc (Polombo, 2009). Cependant, la législation et le contexte général de la filière du solaire ont beaucoup évolué depuis. Les critères utilisés en 2009 concernant la réglementation (zonage urbanistique, zones humides, impact paysager) ne sont plus d'actualité.

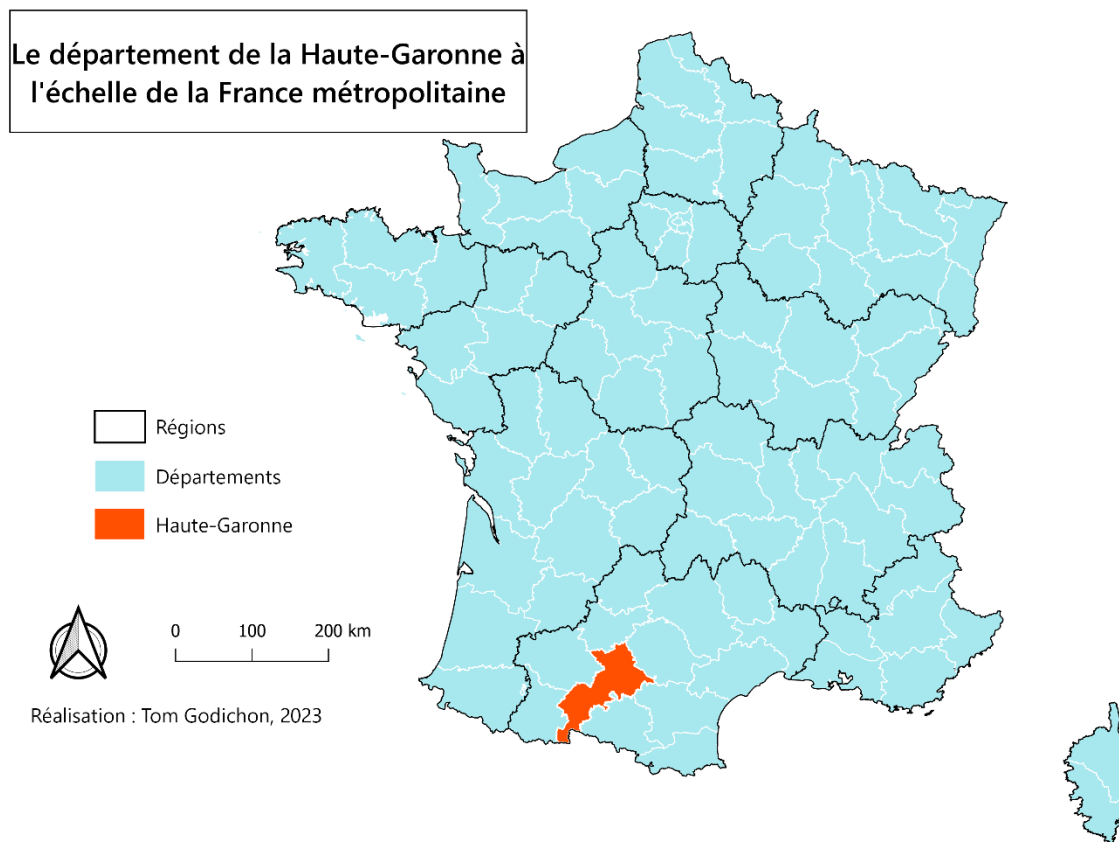
Dans cette partie, nous avons vu que l'utilisation unilatérale des SIG ou de l'AMC dans le cadre de la prise de décision spatiale présentait des limites. La combinaison des deux est une solution qui a été explorée dans le domaine des énergies renouvelables, mais pas récemment pour le solaire. Or, les changements fréquents de réglementation lors de la dernière décennie, liés à la nécessité de développer la technologie sur le territoire français, ont introduit de nouvelles contraintes. Il sera donc intéressant de mettre à jour la stratégie de prospection SIG-AMC pour tenter d'identifier, selon les normes actuelles, des zones d'implantations potentielles de centrales solaires photovoltaïques.

1.4.Zone d'étude : le département de la Haute-Garonne

Dans le cadre de mon stage, j'ai pu me focaliser sur un département en particulier : le département de la Haute-Garonne.

Situé dans le sud-ouest de la France, le département de la Haute-Garonne fait partie de la région Occitanie, et a pour préfecture Toulouse, qui est également le chef-lieu de la région. Comme le montre la figure 5 ci-dessous, le département est très allongé, sur un axe Nord-Sud d'environ 180 km, pour une superficie de 6309 km² (TORNERO, 2013).

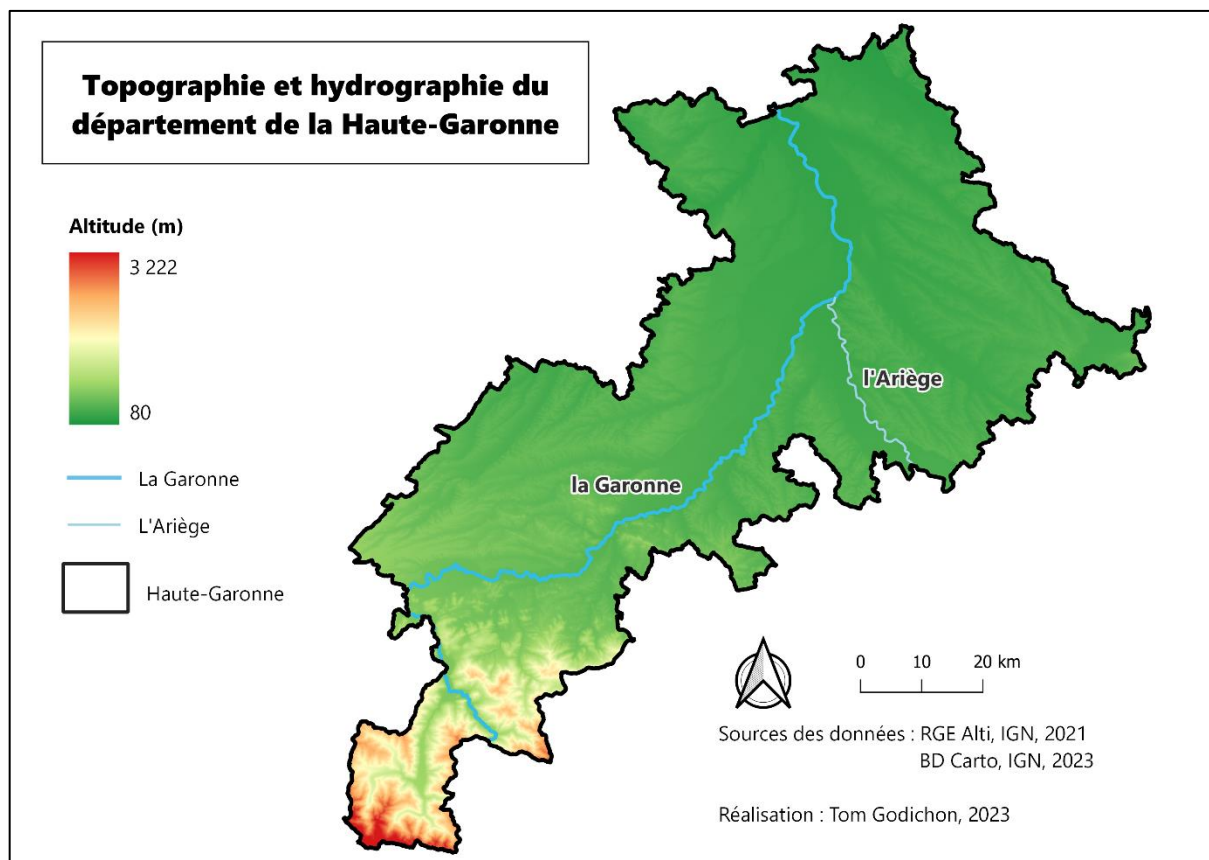
Figure 5 : Localisation du département de la Haute-Garonne
© Tom Godichon, 2023



Sur le plan démographique, le département de la Haute-Garonne est un territoire contrasté, mais très attractif (PUJOL, mars 2016). Avec une population supérieure à 1,25 million d'habitants, dont 84% vivent dans une aire urbaine, c'est le département le plus peuplé d'Occitanie (25% de la population totale de la région). Cependant, la répartition spatiale de la population sur le département n'est pas uniforme. En effet, l'agglomération de Toulouse (3ème plus grande de France après Lyon et Marseille), dans le nord, joue le rôle d'aimant, puisqu'elle concentre à elle seule plus de 93% de la population haute-garonnaise. À l'inverse, la densité de population s'effondre dans le sud du département, plus escarpé, ainsi que dans les zones rurales.

Le gradient Nord/Sud s'applique également à la topographie du département (Conseil départemental de la Haute-Garonne, juin 2021), qui peut être divisé en 3 parties, en suivant les cours d'eau principaux (figure 6).

Figure 6 : Topographie du département de la Haute-Garonne
© Tom Godichon, 2023



Ainsi, les larges vallées en auge et plaines alluviales accueillant les lits de la Garonne et de l'Ariège sont les espaces où l'altitude est la plus faible, descendant jusqu'à 80m dans la partie la plus septentrionale du département. À l'inverse, les plus hautes altitudes sont atteintes au sud, avec l'influence des Pyrénées. Le point culminant est le Pic de Perdiguère, culminant à 3222m d'altitude. Entre la plaine alluviale de la Garonne et les Pyrénées, une zone de piémonts est marquée par une succession de coteaux creusés par les affluents de la Garonne (Volvestre, coteaux du Comminges).

2. Données et méthodologie

2.1. Données mobilisées

Pour identifier et hiérarchiser les ZIP, nous disposons d'un jeu de données permettant de décrire un territoire le plus finement possible. Pour faciliter la gestion et le traitement des données, elles sont regroupées en plusieurs catégories.

2.1.1. Topographie, environnement et agriculture

On retrouve ici les données qui permettent la description physique du territoire. Nous disposons :

- D'un modèle numérique de terrain (MNT) décrivant l'altimétrie, et donc le relief, du département. Pour avoir une analyse la plus fine possible, nous utiliserons le RGE Alti de l'IGN, avec une résolution de 1m. Ce MNT a été produit en 2021 pour le département de la Haute-Garonne. ;
- De l'inventaire des zones humides de Haute-Garonne, disponible sur le site d'open data du département de la Haute-Garonne ;
- De l'inventaire des zones à enjeux environnementaux.

- Des données graphiques des parcelles déclarées à la PAC, via le registre parcellaire graphique (RPG) produit par l'Agence de Services de Paiements (ASP). Nous utiliserons la dernière édition disponible (2021), pour la région Occitanie.

2.1.2. Administratif

Les données administratives concernent le découpage territorial du territoire. On dispose ainsi :

- Des communes à l'échelle française ;
- Des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) : communauté de commune (CC), communauté d'agglomération (CA), communauté urbaine (CU) et métropoles de Haute-Garonne. Cette donnée produite par Opendatasoft, est accessible en open data sur le site du Conseil départemental de la Haute-Garonne ;
- Du découpage des départements de France métropolitaine, produit par Opendatasoft ;
- Du découpage des régions de France métropolitaine, produits par Opendatasoft.

2.1.3. Monuments et paysages

La base de données Mérimée a été créée en 1978 pour référencer le patrimoine monumental en France. Produite par le ministère de la Culture, est organisée en 3 domaines :

- Les Monuments historiques ;
- Les Inventaires généraux ;
- Les Architectures contemporaines remarquables.

C'est dans le premier domaine que sont référencés les monuments classés.

Outre les monuments classés, les paysages d'intérêts peuvent aussi être impactés par la construction de centrales solaires. L'inventaire de ces paysages a été réalisé à l'échelle de la région Occitanie par la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du

Logement d'Occitanie (DREAL – OCCITANIE). La dernière version, publiée en 2023, est téléchargeable sur la plateforme PICTO (Portail Interministériel de la Connaissance du Territoire en Occitanie).

2.1.4. Servitudes et réseaux

Il est important de connaître les éléments physiques présents sur chaque site, car ils peuvent présenter des contraintes techniques, ou des avantages.

La présence de réseaux peut être contraignante lors des phases de construction. Les réseaux à surveiller sont :

- Les lignes électriques ;
- Les réseaux de distribution d'eau ;
- Les réseaux de distribution de gaz ;
- Le réseau routier.

On retrouve deux sources de données pour les lignes électriques. D'une part, les données produites par Enedis, et disponibles sur la plateforme d'open-data d'Enedis (data.enedis.fr) où l'on trouve :

- Les lignes aériennes et souterraines basse tension (BT) ;
- Les lignes aériennes et souterraines haute tension (HT).

D'autre part, les données produites par le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français (RTE), disponibles sur la plateforme d'open-data du gouvernement (data.gouv.fr), où l'on trouve :

- Les lignes aériennes ;
- Les lignes souterraines.

Dans cette catégorie, on retrouve également les points de raccordement, qui permettent de diffuser l'électricité produite par les panneaux solaires sur le réseau. Dans le cadre de la production d'énergie renouvelable, des capacités de raccordement sont réservées dans certains postes. Le choix des postes destinés aux EnR est établi par RTE à travers le Schéma Régional de Raccordement au Réseau des Energies Renouvelables (S3REnR). La capacité d'accueil du réseau est produite par EDF, et téléchargeable sur la plateforme d'open-data du gouvernement. La donnée est mise à jour chaque semaine.

Une fois l'ensemble de ces données collectées, nous pouvons les exploiter à travers la méthodologie suivante.

2.2. Méthodologie de prospection

2.2.1. Identification des terrains admissibles aux appels d'offre de la Commission de Régulation de l'Énergie

La Commission de régulation de l'énergie (CRE) est une autorité administrative indépendante en France chargée de réguler et de superviser les secteurs de l'électricité et du gaz naturel. Créée

en 2000, la CRE exerce ses missions dans le cadre de la loi sur le marché intérieur de l'électricité et du gaz.

Elle s'organise autour de 4 grandes missions :

- 1- Régulation économique : La CRE établit les tarifs réglementés de vente de l'électricité et du gaz naturel pour les consommateurs résidentiels et les petites entreprises. Elle assure également la fixation des tarifs d'utilisation des réseaux de transport et de distribution ;
- 2- Régulation technique : La CRE veille au bon fonctionnement des réseaux d'électricité et de gaz naturel en garantissant l'accès non discriminatoire aux réseaux et en fixant les règles techniques et de sécurité ;
- 3- Surveillance des marchés : La CRE surveille les marchés de l'électricité et du gaz naturel pour s'assurer de leur bon fonctionnement, favoriser la concurrence et prévenir les abus de position dominante ;
- 4- Promotion de la transition énergétique : La CRE encourage le développement des énergies renouvelables et veille à la mise en place des dispositifs de soutien appropriés.

Ainsi, la CRE fixe les tarifs d'achat de l'électricité produite à partir de l'énergie solaire photovoltaïque. Ces tarifs d'achat garantissent aux producteurs une rémunération fixe et stable sur une période déterminée, ce qui favorise le développement de projets solaires photovoltaïques.

Cependant, pour pouvoir bénéficier de ces tarifs avantageux, certains critères sont à remplir. La CRE organise deux fois par an des appels d'offres dans le domaine de l'énergie. Pour le développement des projets photovoltaïque au sol, les développeurs sont invités à répondre, en respectant le cahier des charges, à l'appel d'offre portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire « Centrales au sol » (AO PPE2 PV Sol).

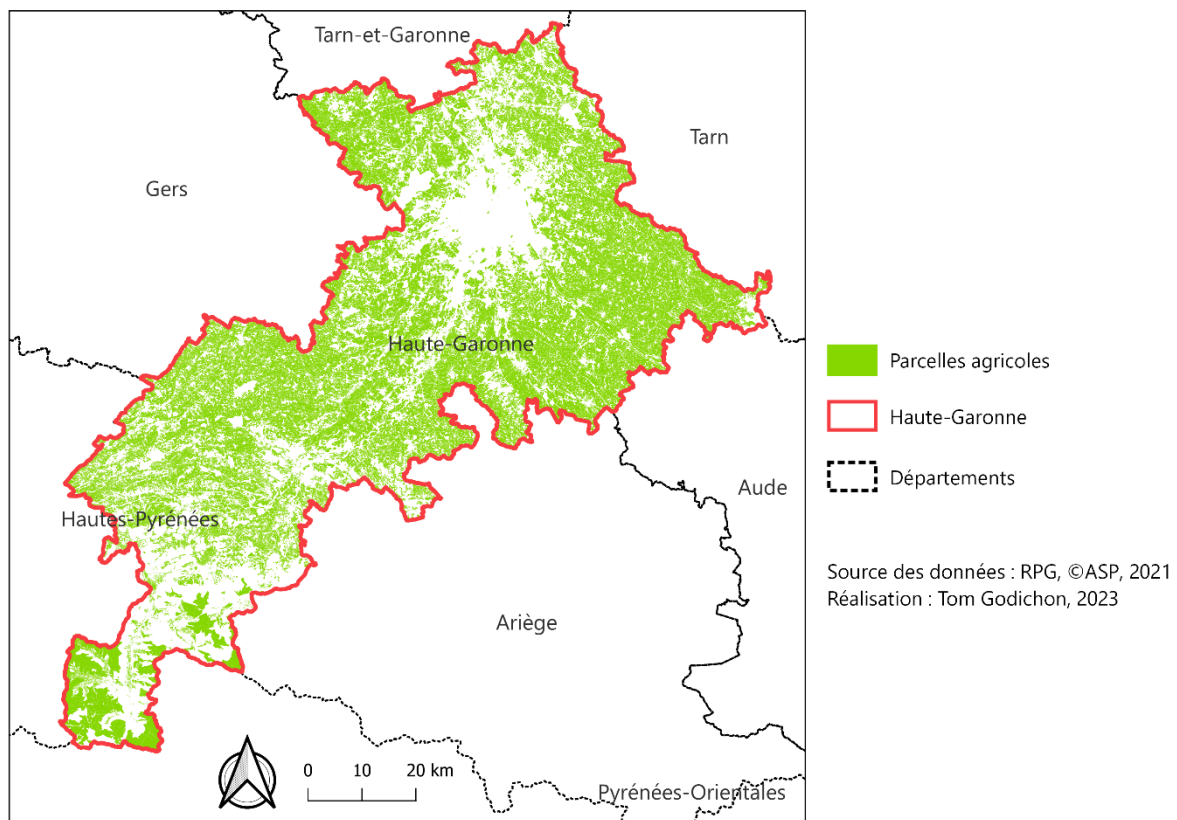
Quatre opportunités de développement sont offertes aux développeurs dans le cadre de cet appel d'offres. D'abord dans les zones à urbaniser (cas 1), couvertes par un zonage au PLU (ou PLUi) adapté (zones U ou AU). Ensuite, dans les zones naturelles (cas 2) dont le zonage au PLU (ou PLUi) autorise les projets photovoltaïques ou d'intérêts collectifs (N-pv, Ne, N-enr...). Depuis 2022, une variante du cas 2 a été ajoutée. Le cas 2 bis correspond aux projets situés dans des zones agricoles, sur des parcelles en jachère depuis au moins 5 ans, ou accueillant une activité d'élevage. Enfin, Le cas 3 correspond aux terrains dont le foncier ne présente pas d'enjeu, souvent en raison d'une pollution ou artificialisation du sol (friches industrielles, carrière, mines, ISDD, aéroport, délaissé fluvial ou routier, plan d'eau...).

Les cas 1 et 3 ont déjà largement été prospectés au sein de l'agence de Toulouse de QENERGY, mais aussi par la plupart des concurrents. La probabilité de prospecter de nouveaux terrains en cas 1 et 3 est donc très faible, ce qui retire l'intérêt de prospecter à nouveau dans cette direction. Le cas 2 présente des risques importants, puisque les zones naturelles abritent souvent une biodiversité qui peut s'avérer sensible. Le cas 2 bis apparaît alors comme l'opportunité la plus favorable, compte tenu du caractère agricole de la région. C'est notamment le cas de la Haute-Garonne, un département majoritairement rural, où l'urbanisation se concentre autour d'un point central.

Dans cette première phase, il s'agira d'identifier les parcelles remplissant les critères nécessaires pour pouvoir candidater à cet appel d'offre, sur le territoire de la Haute-Garonne. Pour cela, les parcelles déclarées à la PAC seront triées, pour ne conserver que celles répondant favorablement à ces critères (zone agricole d'un PLU / PLUi, sur une parcelle en jachère ou pastoralisme). La méthodologie se détaille en 2 parties : une transformation des données brutes, puis une sélection des parcelles admissibles au cas 2bis de l'appel d'offre de la CRE.

La transformation des données brutes concerne les départements de France métropolitaine et les deux RPG. Il faudra ainsi sélectionner le département de la Haute-Garonne. Pour cela, l'outil « Sélection par attribut » de QGIS sera utilisé, en sélectionnant le numéro du département recherché (31). Le RPG étant produit à l'échelle régionale, les parcelles seront sélectionnées pour ne conserver que celles présentes sur notre zone d'étude. L'outil « sélection par localisation » de QGIS est le plus à même d'effectuer cette tâche, en sélectionnant les parcelles qui sont à l'intérieur ou qui chevauchent les contours de la Haute-Garonne (figure 7).

Figure 7 : Parcelles déclarées à la PAC dans le département de la Haute-Garonne en 2021
© Tom Godichon, 2023



Les données sont maintenant prêtes à être utilisées. Les parcelles inscrites au RPG avec un code culture correspondant à des jachères sont sélectionnées (outils « Sélection par attribut »). Les codes correspondant aux jachères et à l'élevage sont :

- J6P : Jachère de 6 ans ou plus (surfaces gelées sans production)
- J6S : Jachère de 6 ans ou plus déclarée comme surface d'intérêt écologique

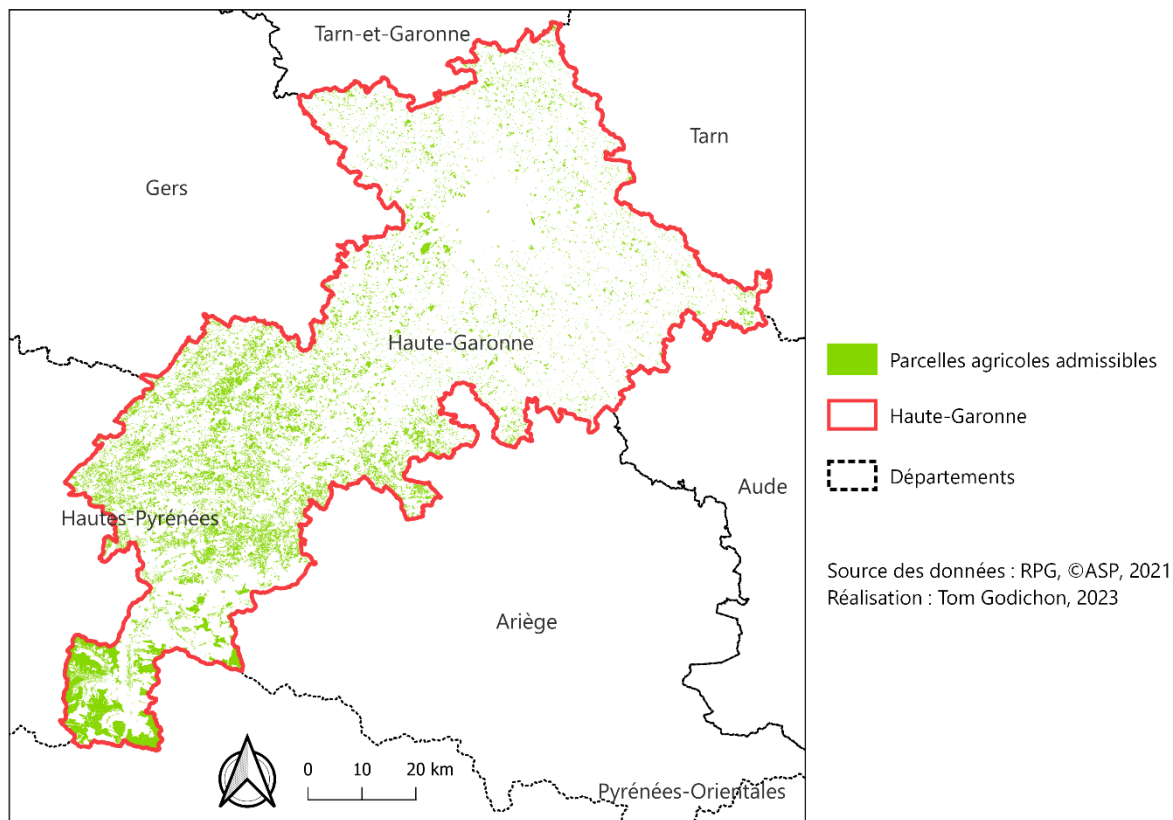
- PPH : Prairie permanente - herbe prédominante (ressources fourragères ligneuses absentes ou peu présentes)
- PRL : Prairie en rotation longue (6 ans ou plus)
- SPH : Surface pastorale - herbe prédominante et ressources fourragères ligneuses présentes

Enfin, les parcelles concernées par une zone humide sont écartées (outil « Sélection par localisation »).

Cette première partie de la méthodologie, sous forme schématique, est à retrouver en annexe (annexe A). À l'issue de cette phase, on obtient les parcelles admissibles au cas 2 bis de la CRE, sur une emprise géographique correspondant à la zone de prospection (figure 8).

Figure 8 : Parcelles agricoles admissibles au cas 2 bis de l'appel d'offre AO PPE2 PV de la CRE

© Tom Godichon, 2023



En partant des près de 140 000 parcelles déclarées à la PAC en Haute-Garonne, cette première phase a permis d'en identifier 40 000 qui répondent aux critères imposés par la CRE. Pour continuer d'affiner notre recherche, nous devons également prendre en compte les contraintes imposées par QENERGY. Ainsi, nous pourrions identifier les réelles zones d'implantations potentielles.

2.2.2. Localisation des zones d'implantations potentielles

Une parcelle respectant les critères de la CRE n'est pas nécessairement une parcelle favorable au développement de projets photovoltaïques au sol. En effet, il faut prendre en compte les contraintes techniques au développement, comme les conditions topographiques. De plus, les stratégies économiques et de l'entreprise sont

L'objectif de cette partie sera donc d'appliquer cette stratégie et d'identifier les contraintes techniques, afin de sélectionner les parcelles situées dans des zones favorables au développement solaire.

Lorsqu'on s'intéresse aux contraintes techniques, deux axes de travail apparaissent. D'un côté, les contraintes liées au relief (pente, exposition), et de l'autre les contraintes de distance aux infrastructures (accès au site et raccordement).

Concernant les contraintes liées au relief, l'installation de panneaux solaires ne peut se faire sur des pentes supérieures à 20% (inclinaison optimale). Pour que la production d'un module soit optimale, il doit être orienté vers le Sud. Les orientations ouest et est sont tolérées. En revanche, l'exposition nord est à éviter au maximum.

Concernant les connexions aux réseaux (routes et raccordement électrique), la solution de la plus courte distance est toujours la meilleure. Le raccordement entre la centrale photovoltaïque et le poste le plus proche est défini et réalisé par ENEDIS, car, d'après le décret n°2015-1823 du 30 Décembre 2015, les ouvrages de raccordement nécessaires au transport de l'électricité produite constituent une extension du réseau public de distribution. Cependant, bien que l'ouvrage soit public, les coûts inhérents à la création de ce réseau (études et installation) sont intégralement à la charge du développeur qui détient le projet (donc ici, QENERGY). En moyenne, le coût de raccordement est estimé à 10 000€/km. La proximité à un poste de raccordement est donc un enjeu essentiel pour la viabilité économique du projet. En Haute-Garonne, et comme pour la plupart des départements français, la plupart des postes sont saturés, ce qui signifie qu'ils n'ont plus la capacité d'accueillir de nouvelles sources d'alimentation. Le poste peut alors être agrandi pour augmenter sa capacité, ou un nouveau poste peut être construit, si le projet est trop isolé.

L'accessibilité depuis les routes est également à prendre en compte. En effet, les véhicules utilisés pour l'approvisionnement lors des phases de construction (camions pour l'apport de matériel, engins pour la construction et le terrassement) sont souvent de grand gabarit, et peuvent présenter un poids important. Le projet doit donc être proche des axes de circulation principaux, pour permettre aux véhicules de s'approcher au maximum des sites. L'accès final se fait via la création ou la rénovation de pistes, là aussi au frais de QENERGY. Il faut donc prioriser les sites à proximité des routes nationales et des autoroutes.

Cependant, on ne peut pas mettre de limite de distance, que ce soit pour les postes ou les routes. En effet, ces distances tolérées dépendent de la taille du projet (plus le projet est gros, plus il a un rendement économique élevé, et donc plus la distance peut être longue).

Pour QENERGY, d'autres critères rentrent en compte, pour des raisons de contraintes administratives et de rentabilité économique.

Lors des premières phases de développement d'un projet, la question de la rentabilité économique est rapidement évoquée. L'entreprise possède des modèles de simulation permettant d'adapter les conditions de construction d'un projet (puissance crête à atteindre, montant des loyers...). Quel que soit le modèle utilisé, les projets inférieurs à 5 hectares sont pour la plupart déficitaires. Ainsi, il a été décidé de ne s'intéresser qu'au projet d'au moins 5 ha.

Concernant les contraintes administratives, la volonté de l'entreprise est d'éviter au maximum les contre-temps et complications liées aux contraintes environnementales. En effet, les projets sur des milieux agricoles présentent déjà une très grande contrainte, qui limite considérablement le nombre de projets en développement : le passage devant la Commission départementale de préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers (CDPENAF). Cette commission a pour objectif de lutter contre l'artificialisation des sols (terres naturelles, agricoles ou forestières). Les développeurs de projets solaires sont tenus de démontrer lors de cette commission la nécessité et l'inéluctabilité d'installer une centrale photovoltaïque sur cette parcelle (ministère de l'Agriculture et de l'alimentation, juillet 2019).

L'ajout de contraintes environnementales n'est donc pas possible. Ainsi, les zones concernées par un zonage de protection de l'environnement sont à proscrire.

En parallèle, les impacts paysagers sont aussi à prendre en compte. Il est requis de se situer à plus de 500m des monuments classés et des sites classés par la DREAL, afin d'éviter d'éventuelles études paysagères supplémentaires.

Ainsi, les ZIP sont les parcelles qui valideront les critères suivants :

- Pente moyenne sur la parcelle inférieure à 20%
- Exposition moyenne de la parcelle vers le sud, le sud-est ou le sud-ouest
- Absence de zonages environnementaux sur la parcelle
- Distance à 500m des monuments classés

Pour les sélectionner, nous utiliserons les parcelles admissibles identifiées dans la première partie.

Le MNT de la Haute-Garonne sera utilisé pour obtenir les pentes et l'exposition sur l'ensemble du département (outils « Pente » et « Exposition » de QGIS). L'ensemble des couches de zonages environnementaux sera utilisé, sans distinction. Enfin, les monuments classés seront issus de la base de données Mérimée. Pour les monuments historiques et les espaces classés par la DREAL, des zones tampons de 500m seront créées avec l'outil « Tampon » de QGIS.

Dans un premier temps, l'attention sera portée sur les données environnementales et les monuments. Une sélection par localisation sera réalisée, en superposant aux parcelles les couches environnementales (annexe B).

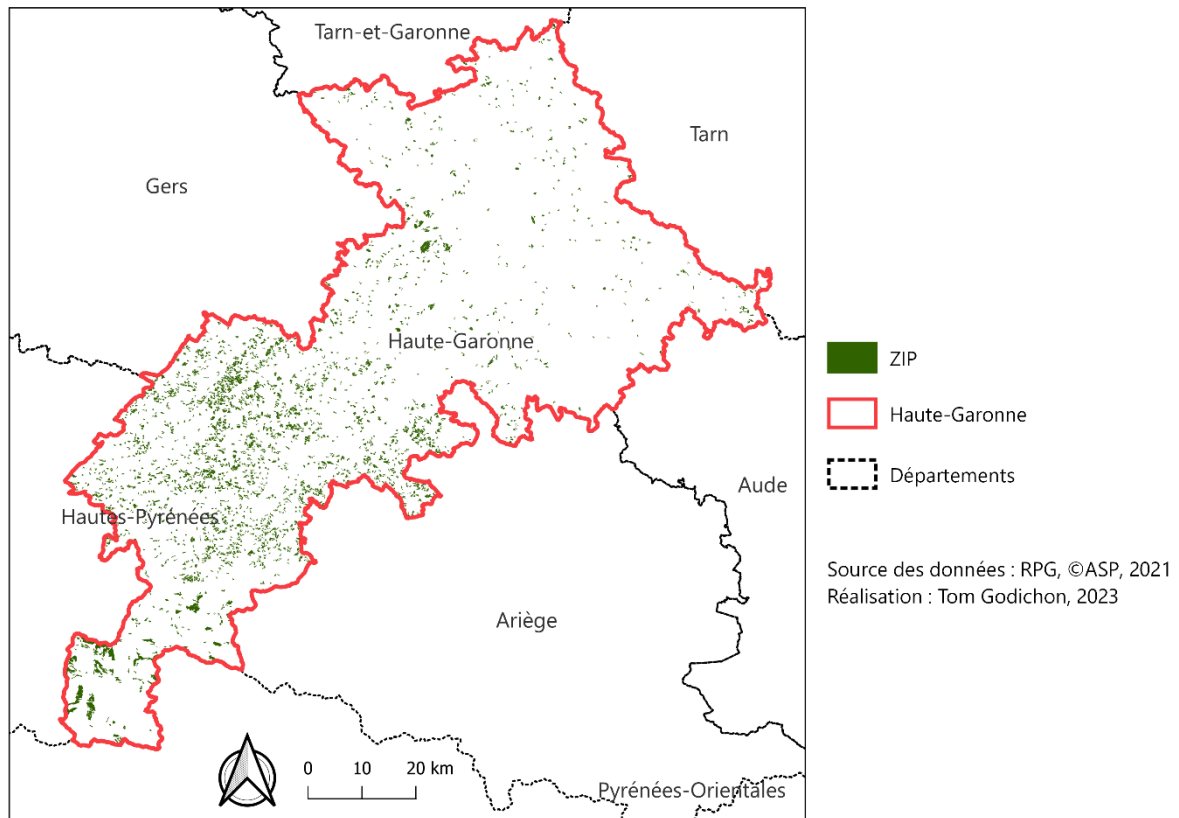
On obtient alors les parcelles à moindre enjeu environnemental. Puis, on élimine par le même procédé les parcelles situées à proximité d'un monument classé ou d'un site DREAL, en ajoutant une zone tampon de 500m. (annexe C).

Pour les parcelles restantes, on calcule leur pente et exposition moyenne. L'outil « Statistiques de zone » permet de calculer des statistiques simples (somme, moyenne, médiane...) d'un raster (pente et exposition), sur l'emprise d'un vecteur (parcelles sélectionnées). On sélectionne

ensuite les parcelles dont la pente est inférieure à 20%, et on élimine enfin les parcelles orientées vers le nord (annexe D).

Ainsi, on obtient la localisation des parcelles qui remplissent tous les critères pour être considérées comme des zones d'implantations potentielles (figure 9).

Figure 9 : Zones d'implantation potentielle de centrales solaires dans le département de la Haute-Garonne
© Tom Godichon, 2023



2.2.3. Hiérarchisation des ZIP : analyse multicritère

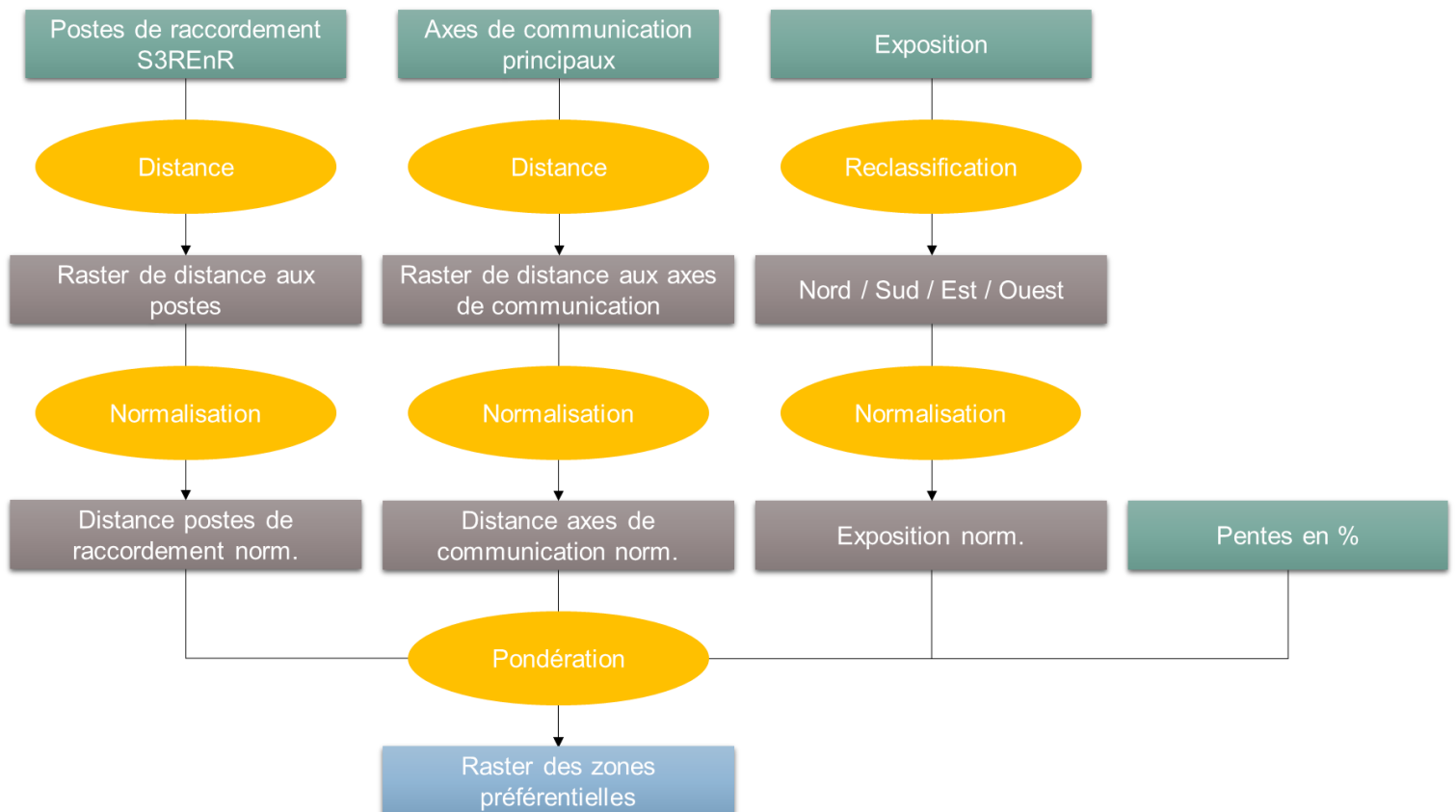
Le processus précédent a permis de conserver uniquement les parcelles sur lesquelles le développement d'un projet solaire est possible, en ajoutant les contraintes de l'entreprise à celles de la CRE. Dans cette dernière phase, l'objectif sera de hiérarchiser le territoire via une analyse multicritère, afin d'identifier le niveau de contrainte au développement de projets photovoltaïques sur le département haut-garonnais.

Pour cela, quatre critères seront à analyser et à pondérer :

- L'exposition
- Les pentes
- La distance aux axes de communication principaux (autoroutes et routes nationales)
- La distance aux postes de raccordement

Afin de pouvoir réaliser une analyse multicritère pertinente, le premier objectif est de normaliser chaque critère, pour obtenir des plages de valeurs équivalentes entre les critères (de 0 à 1), puis de pondérer les critères entre eux pour obtenir une cartographie des zones d'implantations préférentielles. Ainsi, plus la valeur du pixel sur le raster final sera faible, plus les critères d'implantations seront favorables. La méthodologie est présentée dans la figure suivante (figure 10) :

Figure 10 : Méthodologie de l'analyse multicritère
© Tom Godichon, 2023



La pente est le seul critère déjà adapté, puisqu'elle est exprimée en %, et est donc déjà normalisée. Il suffit, via la calculatrice raster de QGIS, de diviser les valeurs par 100.

Pour les deux critères de distance (axes de communication et postes de raccordement), une sélection des données est nécessaire. Pour les routes, une sélection par localisation permet d'identifier les routes traversant le département de la Haute-Garonne, puis une sélection par attribut permet de ne conserver que les autoroutes et routes nationales. Pour les postes de raccordement, seule la première étape est nécessaire.

L'outil « Proximité » permet de calculer la distance entre certains pixels d'un raster. Il suffit donc d'avoir un raster de même résolution que la pente (1m * 1m), où tous les pixels ont une valeur constante, sauf ceux correspondant aux points ou lignes visés. Ainsi, après avoir rastérisé la couche souhaitée (routes ou postes de raccordement), en attribuant la valeur 2 à chaque pixel, on la fusionne à une couche raster de valeur constante, où tous les pixels ont la valeur 1. On peut ainsi grâce à l'outil « Proximité » calculer la distance de chaque pixel aux pixels dont la valeur est 2.

Une fois le raster de distance obtenu, il faut normaliser ses valeurs. Pour cela, on réalise une normalisation de la valeur d'un pixel (x) à partir des valeurs minimales (x_{min}) et maximales (x_{max}) du raster. La formule est :

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Pour récupérer les valeurs de x_{max} et x_{min} , on utilise la fonction « Statistiques de la couche raster » sur QGIS. Le calcul est quant à lui réalisé avec la calculatrice raster. Les méthodologies, appliquées au cas de routes et des postes, sont schématisées en annexes E et F. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 11 et 12.

Figure 11 : Distance normalisée aux postes de raccordement
© Tom Godichon, 2023

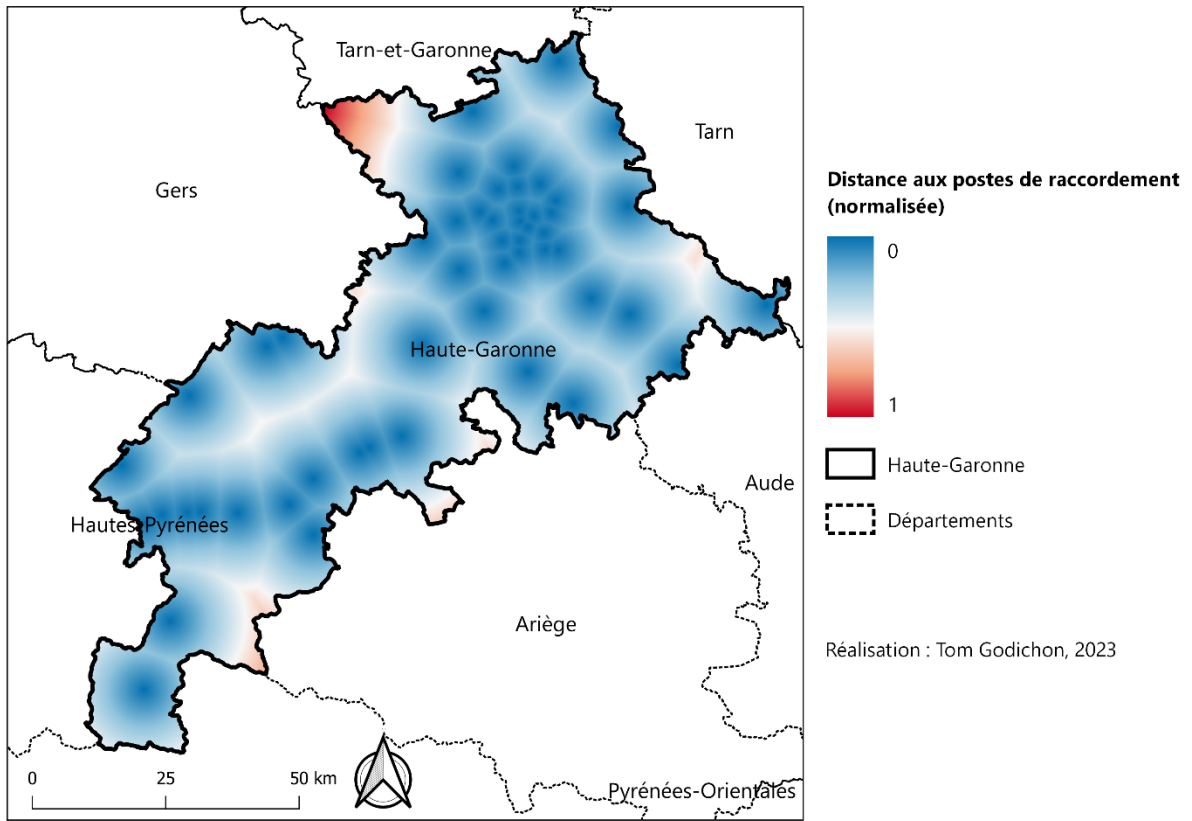
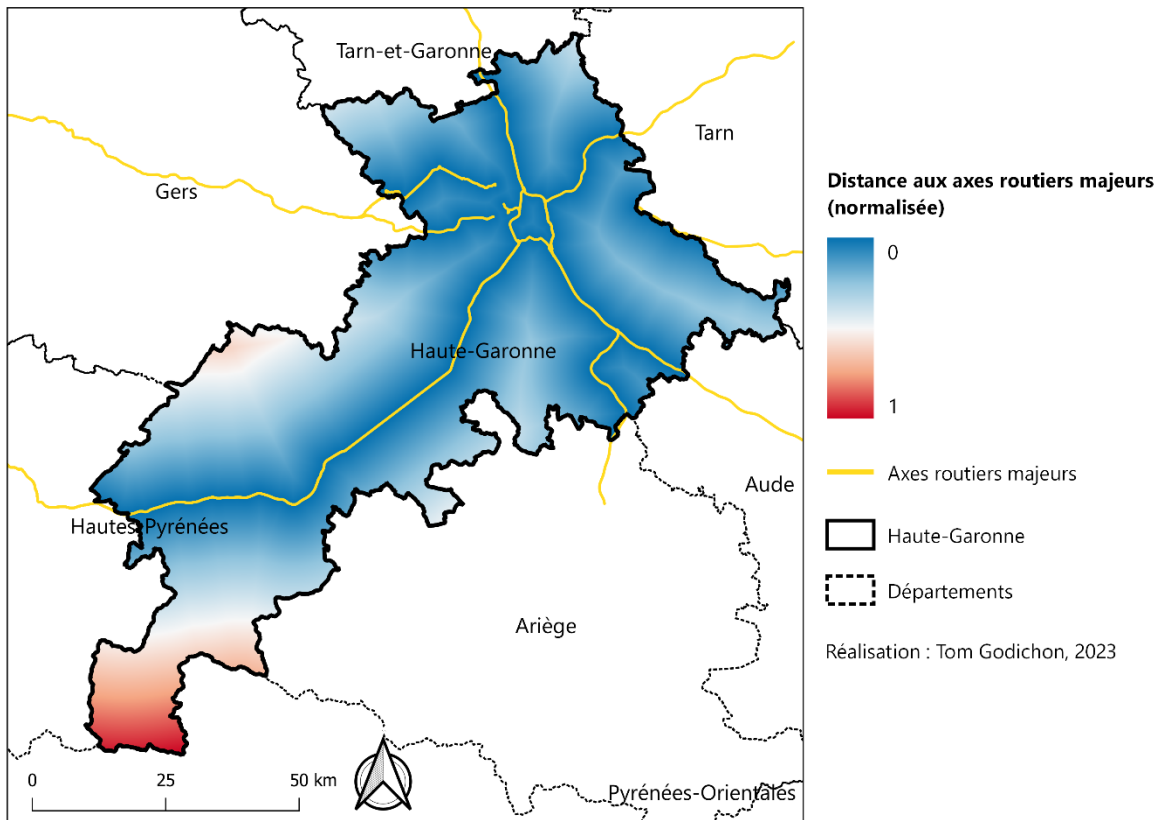


Figure 12 : Distance normalisée aux axes routiers majeurs
 © Tom Godichon, 2023



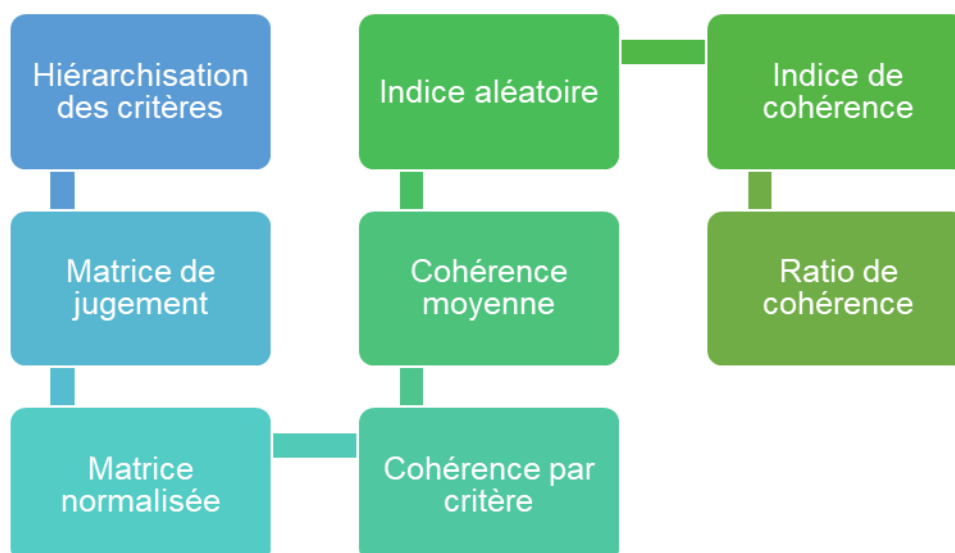
Contrairement aux critères de distance, la normalisation des valeurs d'exposition ne peut se faire directement. En effet, les valeurs à mettre en valeur (entre 90° et 270°) sont au centre de la distribution (de 0° à 360°). Par conséquent, il sera impossible de les faire ressortir sans une reclassification. L'exposition ayant déjà été mesurée lors de la phase précédente. L'objectif ici sera donc de reclassifier cette exposition, pour distinguer Nord, Sud, Sud-Est et Sud-Ouest. Les classes seront définies entre les bornes suivantes :

- Nord : $[0^\circ ; 90^\circ[\cup]270^\circ ; 360^\circ]$
- Sud : $[135^\circ ; 225^\circ]$
- Sud-Est : $[90^\circ ; 135^\circ[$
- Sud-Ouest : $]225^\circ ; 270^\circ]$

La méthode AHP de Thomas Saaty (Saaty, 1980) permet d'attribuer une valeur à chacune de ces classes. Elle permet de vérifier la cohérence d'une hiérarchisation, et de calculer un poids normalisé (compris de 0 à 1) pour chaque critère (Piton et al., 2018).

La méthode s’articule en 8 étapes, résumées dans le schéma ci-dessous (figure 13) :

Figure 13 : Les 8 étapes de l’AHP de Saaty
 © Tom Godichon, 2023.
 D’après Rakotoarivelo, 2015.



La hiérarchisation des expositions se fera à partir de recherches bibliographiques. Plusieurs études ont été menées par la Chambre d’Agriculture du Loiret sur le sujet (Deseau, juillet 2021). Les conclusions de ces études montrent que, par rapport à une orientation plein Sud, une exposition Nord se traduit par une diminution de 28% de la production d’électricité (soit environ - 77% de rentabilité, en fonction de la taille du projet). Pour les orientations Sud-Est et Sud-Ouest, les résultats sont équivalents, avec une perte de 8% de production.

La hiérarchisation se traduit alors par des valeurs de comparaison de critère par binôme, qui sont renseignées dans la matrice de jugement (annexe G), les plus hautes étant attribuées aux conditions les plus défavorables, en adéquation avec les critères précédents), qui est ensuite normalisée pour obtenir les poids attribués à chaque critère (figure 14).

Figure 14 : Matrice normalisée (exposition)
 © Tom Godichon, 2023

Matrice normalisée						
	Sud	Ouest	Est	Nord	Somme	Poids
Sud	0,05	0,03	0,03	0,07	0,18	0,04
Ouest	0,25	0,14	0,14	0,13	0,66	0,17
Est	0,25	0,14	0,14	0,13	0,66	0,17
Nord	0,45	0,69	0,69	0,66	2,50	0,63
Somme	1	1	1	1	4	1

Pour vérifier si la hiérarchisation proposée est cohérente, une série de calculs permet d'aboutir à un ratio de cohérence (RC). Un ratio inférieur à 0,1 démontrerait la cohérence matrice. L'ensemble des calculs sont à retrouver dans la figure ci-dessous (figure 15) :

Figure 15 : Vérification de la cohérence de la pondération par le calcul du ratio de cohérence

© Tom Godichon, 2023

Vérification de la cohérence de la pondération						
	Sud	Ouest	Est	Nord	Somme des lignes	Cohérence du critère
Sud	0,04	0,03	0,03	0,07	0,18	4,03
Ouest	0,22	0,17	0,17	0,13	0,68	4,11
Est	0,22	0,17	0,17	0,13	0,68	4,11
Nord	0,40	0,83	0,83	0,63	2,68	4,28
Cohérence moyenne						4,13
Indice aléatoire (IA)						0,90
indice de cohérence (IC)						0,04
Ratio de cohérence (RC)						0,05

Ici, le RC = 0.05, donc la matrice est validée. On peut réaliser la reclassification, en attribuant à chaque classe le poids attribué par l'AHP.

L'ensemble des critères ont donc été normalisés. La pondération inter-critère peut alors être calculée. Pour ce faire, une AHP est une nouvelle fois à réaliser, inter-critère cette fois-ci. Dans ce cas, la hiérarchisation est imposée par la stratégie de l'entreprise. Ainsi, les critères sont classés dans la matrice comme suit (figure 16), donnant un poids plus important aux critères sur lesquels QENERGY a le moins de pouvoir d'action :

Figure 16 : Matrice de jugement de l'AMC inter-critères

© Tom Godichon, 2023

Matrice de jugement				
	Routes	Raccordement	Pentes	Exposition
Routes	1	0,25	0,14	0,14
Raccordement	4	1	0	0,20
Pentes	7	5	1	1,00
Exposition	7	5	1	1
Somme	19	11,25	2,34	2,34

La matrice, une fois normalisée (annexe H), nous donne les poids suivants :

- Exposition : 0,42
- Pente : 0,42
- Distance aux postes de raccordement : 0,12
- Distance aux axes de communication : 0,05

Avec un ratio de cohérence de 0,05, la classification est considérée comme cohérente. La pondération peut donc être effectuée.

La formule de pondération (P) est donc :

$$P = \sum n * c_n$$

Pour conserver des résultats normalisés (entre 0 et 1), la formule peut être adaptée :

$$P_{norm} = \sum \frac{n * c_n}{c_n * n_{max}}$$

Avec :

- n = valeur du pixel pour un critère
- n_{max} = valeur maximale du critère
- c_n = coefficient du critère

Dans le cadre de cette étude, ce ne sera pas nécessaire, les résultats étant déjà normalisés. En effet, la somme des coefficients est égale à 1, et les valeurs de n_{max} sont toujours de 1, puisque les critères ont été normalisés. La somme des $c_n * n_{max}$ est donc égale à 1.

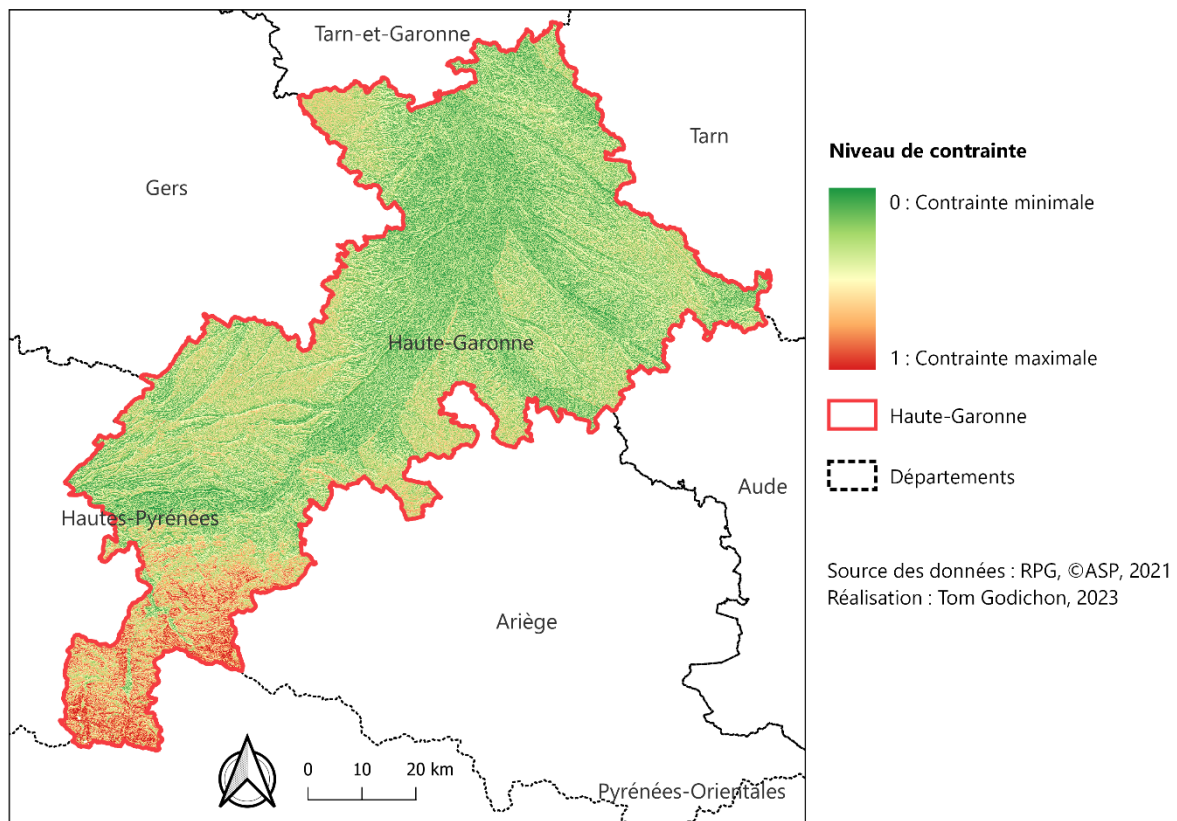
Une fois la pondération effectuée, on obtient une carte où la valeur de chaque pixel correspond à un indice du potentiel d'implantation d'après les critères, de 0 (potentiel élevé) à 1 (potentiel faible).

3. Résultats

La méthodologie s'est déroulée en trois temps : l'identification des parcelles déclarées à la PAC admissibles à la CRE, puis la délimitation des ZIP prenant en compte les critères de l'entreprise, et enfin la hiérarchisation des ZIP.

Le premier résultat obtenu est la carte de l'indice potentiel d'implantation de projets solaires sur l'ensemble du département de la Haute-Garonne (figure 17). On peut y observer la forte influence des contraintes liées au relief. En effet, les zones les plus favorables sont localisées le long des principaux cours d'eau (Garonne, Ariège, Canal du Midi). Les côtes et piémonts des Pyrénées ont un indice moyen (environ 0,5). L'indice est plus élevé au cœur des Pyrénées, où les pentes sont les plus élevées, et où l'exposition a le plus d'influence. Les axes de communication majeurs, qui longent ces cours d'eau, renforcent l'effet du relief.

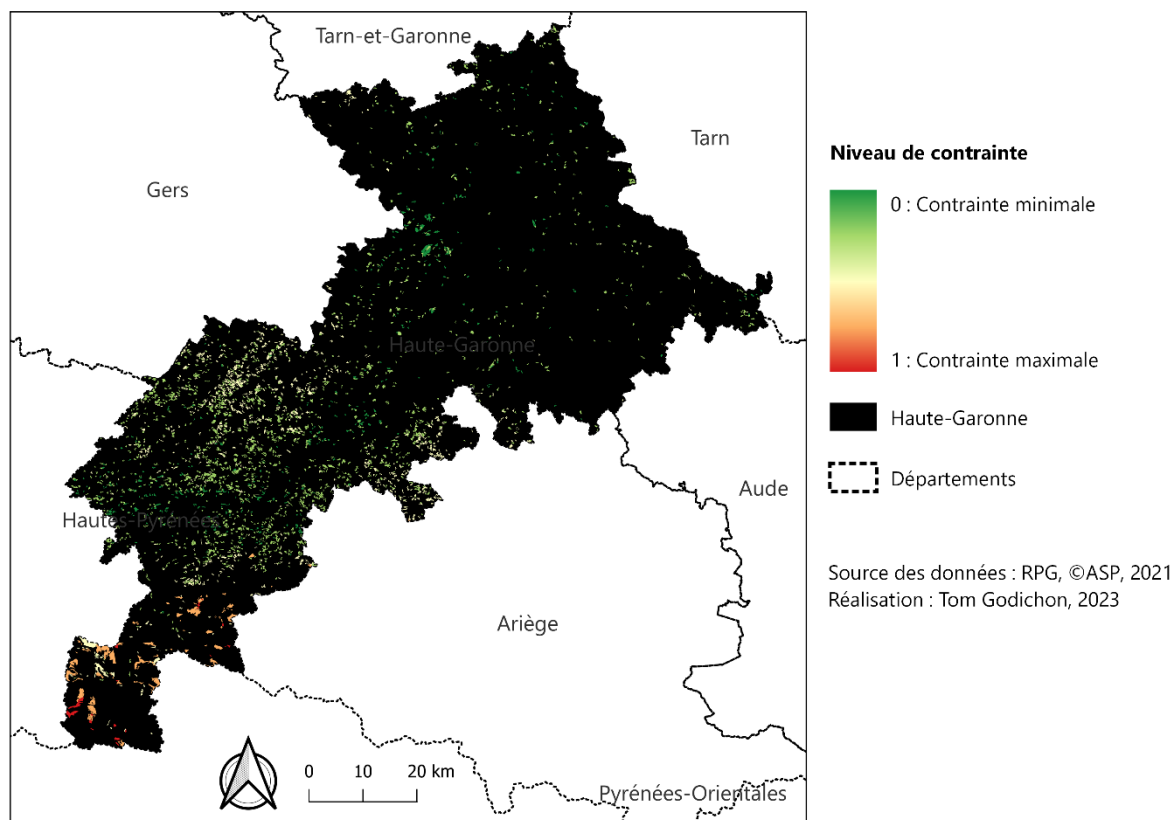
Figure 17 : Niveau de contrainte au développement de projets PV au sol dans le département de la Haute-Garonne
© Tom Godichon, 2023



On peut cependant aller plus loin, en attribuant un indice de potentiel d'implantation aux parcelles identifiées plus tôt. Pour cela, on calcule la moyenne des pixels sur l'étendue de chaque parcelle. Ainsi, on obtient un score moyen, qui permet de hiérarchiser les parcelles admissibles à la CRE.

Le résultat est présenté sur la figure 18. Cette carte permet de mettre en évidence, de manière visuelle, les parcelles agricoles en friche les plus favorables à l'implantation de centrales photovoltaïques au sol.

Figure 18 : Niveau de contrainte moyen par parcelle
© Tom Godichon, 2023

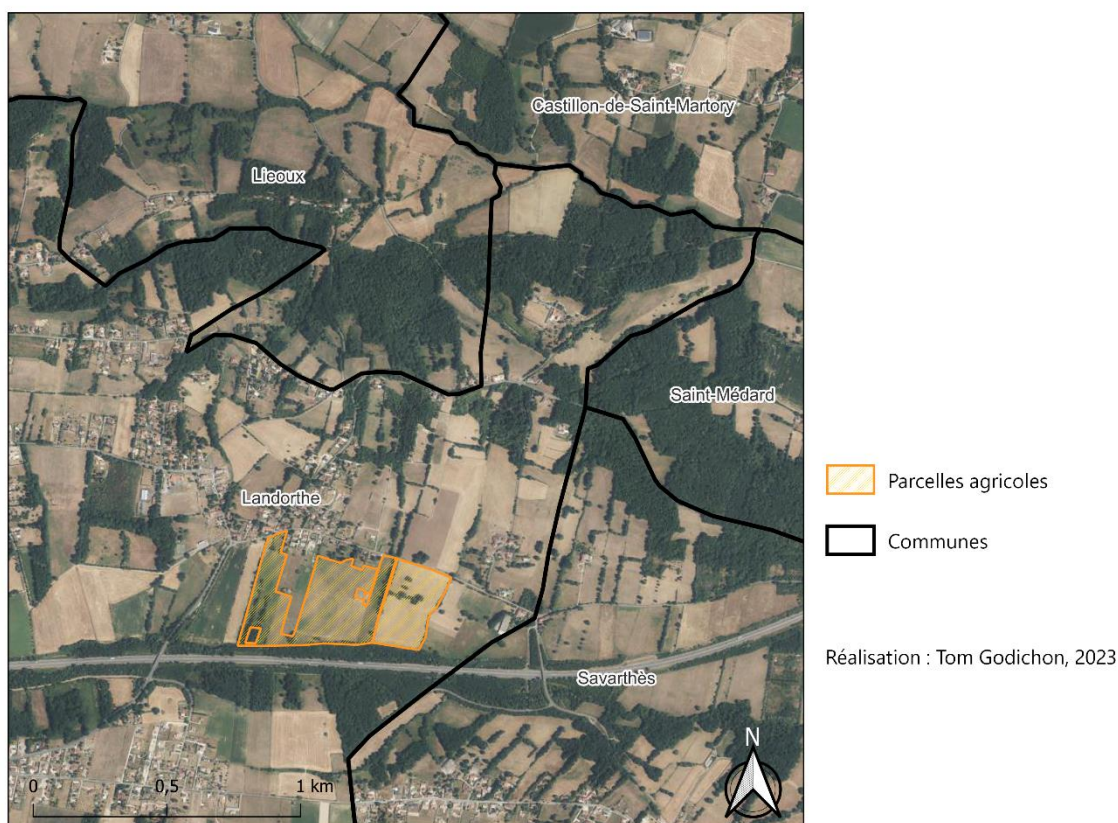


Au-delà d'identifier les ZIP les plus favorables, cette carte permet également d'identifier les espaces où se concentrent ces ZIP. Elle permet donc de localiser les territoires à prioriser, notamment pour la prise de contact avec les collectivités locales (mairies et communautés de communes).

Ainsi, on peut avec cette carte identifier les trois parcelles présentant le moins de contraintes, et les analyser plus en profondeur. Cela permettra de s'assurer que ces parcelles présentent un réel intérêt pour le développement de projets photovoltaïques.

On peut remarquer que les deux « meilleures » parcelles sont accolées, et situées sur la même commune : Landorthe (figure 19).

Figure 19 : Localisation des deux parcelles identifiées comme les plus favorables
© Tom Godichon, 2023



Rassemblées, ces deux parcelles occupent une surface totale de 19,5 hectares (6 ha pour celle à droite, et 13,5 ha pour celle à gauche). Elles possèdent également le même code de culture, PPH : Prairie permanente - herbe prédominante (ressources fourragères ligneuses absentes ou peu présentes). Du fait de l'absence de zones humides et de zonages environnementaux, ces deux parcelles sont bien admissibles aux appels d'offres de la CRE.

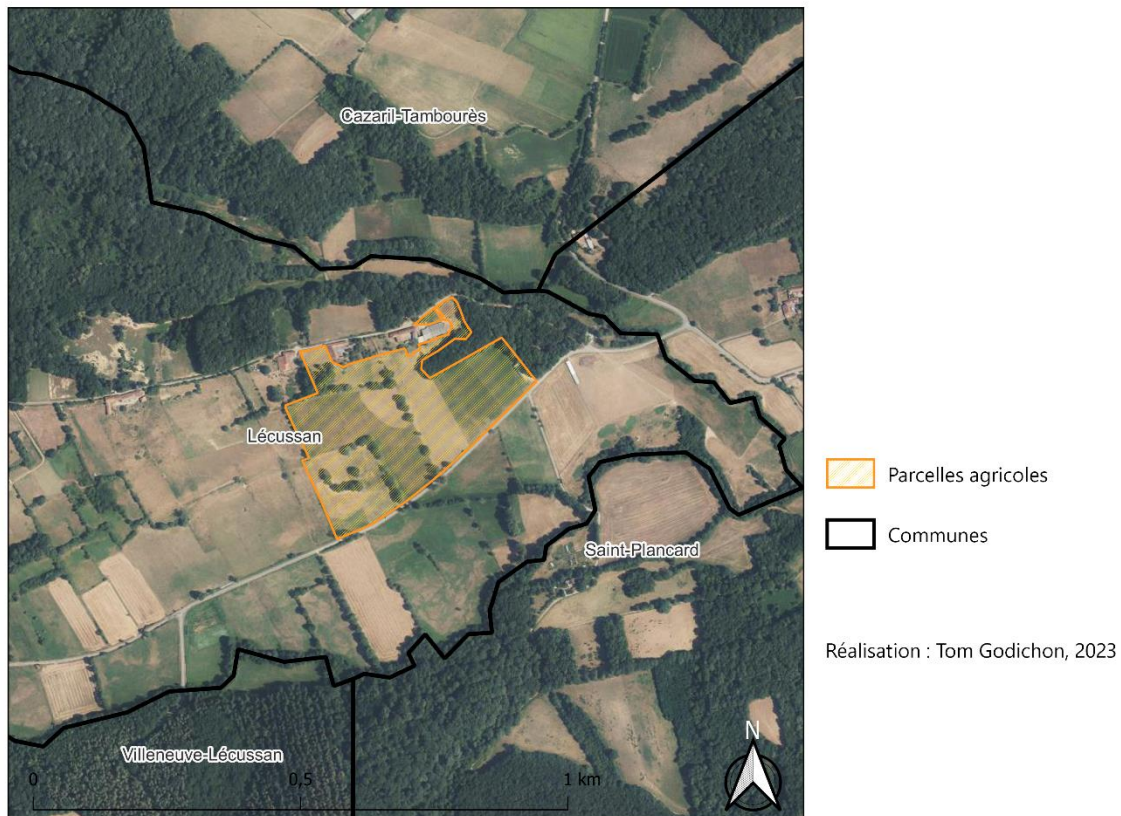
Elles sont situées à 11,2 km du poste de raccordement de La Gentille, situé au niveau de la centrale hydroélectrique de Miramont de Comminges (annexe I). Concernant les coûts liés au raccordement, l'approche de QENERGY est la suivante : la distance au poste doit être inférieure à la surface totale du projet. Ici, on a 11,2 km de raccordement pour un projet potentiel de 19,5 ha. Ainsi, la distance de raccordement est acceptable. Par ailleurs, les parcelles sont traversées par une ligne souterraine de 63 kV, gérée par RTE. Si le projet est mené à son terme, il conviendra alors de réaliser une levée de servitudes, afin d'éviter tout incident lors de la construction.

D'un point de vue du zonage urbanistique, la commune de Landorthe est couverte par le RNU (Règlement National d'Urbanisme). Dans ce cas, le projet doit être situé sur « une parcelle constituant une jachère agricole de plus de 5 ans ou accueillant une activité d'élevage ». Cette condition est respectée, puisque le code culture PPH garantit une prairie en jachère depuis au moins 5 ans.

Sur ces deux parcelles, les critères imposés par la CRE et QENERGY sont remplis. Elles peuvent donc être sélectionnées pour tenter d'y développer une centrale photovoltaïque. Cependant, certains critères non mesurables, mais essentiels restent à déterminer : la volonté des propriétaires et des élus locaux, ainsi que leurs relations.

La troisième parcelle semblant présenter le moins de contraintes est située sur la commune de Lécussan (figure 20).

Figure 20 : Localisation de la ZIP de Lécussan
© Tom Godichon, 2023



Cette parcelle est également une prairie permanente herbeuse (PPH), dont la superficie est légèrement supérieure à 10 hectares. Elle est située à 6km du poste de raccordement de Cazaril (annexe J).

La commune de Lécussan est couverte par un PLU (plan local d'urbanisme), dont la dernière procédure a été approuvée en fin d'année 2018. Le terrain doit donc se trouver dans un zonage agricole. Notre parcelle se situe en zone A, qui correspond à l'activité agricole. Nous sommes donc en présence d'un terrain en jachère depuis au moins 5 ans situé dans une zone agricole. La candidature aux appels d'offres de la CRE est donc possible. Le détail du règlement du PLU de Lécussan apporte une information supplémentaire : il est possible d'implanter des centrales solaires photovoltaïques en zone A dans la commune. En effet, sont autorisées, d'après ce règlement, « Les ouvrages techniques nécessaires à l'exploitation des services publics ou d'intérêt collectif ». Or, les centrales solaires peuvent être considérées comme des ouvrages d'intérêt collectif.

Si l'on regarde les résultats à l'échelle du département, on peut identifier des EPCI auprès desquelles il est urgent de se faire connaître, car elles disposent d'un gisement de fonciers importants, tant en quantité qu'en qualité. C'est notamment le cas de la Communauté de Communes (CC) Cœur et Côteaux du Comminges, qui contient un tiers des terrains identifiés (1116 parcelles), mais aussi un tiers de la surface totale (10 000 hectares).

À l'inverse, certains EPCI ne présentent pas un grand intérêt. C'est notamment le cas des EPCI situés au nord du département, où l'expansion de la métropole toulousaine tend à réduire considérablement le nombre de terrains en friche, qui sont rapidement urbanisés. Ainsi, on retrouve assez peu d'opportunités dans les EPCI suivants :

- Toulouse Métropole ;
- CA du Sicoval ;
- CA Le Muretain Agglo

D'autres EPCI se situent sur des territoires au relief escarpé, qui rendent difficiles le développement de projets solaires. C'est le cas de la CC Pyrénées Haut Garonnaises, située à l'extrême sud du département, là où les pentes sont les plus fortes. Mais c'est aussi le cas de la CC des Hauts Tolosans et de la CC des Terres du Lauragais, qui sont situées sur les piémonts des Pyrénées.

Conclusion, limites et perspectives

Nous avons observé qu'il n'existait pas encore de méthodologie permettant d'identifier des ZIP, aussi bien dans les publications scientifiques publiques qu'au sein de l'entreprise. La stratégie de prospection était, pour QENERGY France, d'analyser les territoires de manière « aléatoire ». Les SIG sont utilisés pour visualiser et superposer des couches de contraintes, mais leur usage n'est pas optimisé.

La méthodologie proposée dans ce mémoire avait pour objectif d'identifier efficacement des zones d'implantations potentielles de centrales solaires au sol, dans un contexte de transition énergétique liée au changement climatique, et d'un marché porteur de plus en plus concurrentiel. Cette méthodologie se présentait en trois temps :

- D'abord une identification des zones admissibles au cas 2 bis de l'appel d'offre de la CRE. Cette première phase consistait en une recherche de terrains agricoles en jachère ou accueillant de l'élevage, et qui n'étaient pas concernés par des zones humides.
- Ensuite, la localisation des zones d'implantations potentielles, en appliquant les critères internes à l'entreprise (distances aux infrastructures, zonages environnementaux) et les contraintes liées au relief (pente et exposition)
- Enfin, une analyse multicritère a permis de hiérarchiser les ZIP en fonction de leur potentiel de développement

L'application de cette méthodologie sur la Haute-Garonne a permis, dans un premier temps, de réduire considérablement le nombre de parcelles à analyser. En effet, sur les 140 000 parcelles déclarées à la PAC dans le département, nous avons pu en identifier environ 3000 qui peuvent être classées comme ZIP. On a donc pu éliminer, en quelques traitements SIG, environ 98% des parcelles. Le classement des parcelles restantes permet de se focaliser sur celles qui ont le meilleur potentiel, et donc d'établir des priorités dans la prospection et la prise de contact avec les propriétaires.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons affirmer que la méthode employée ici a permis d'obtenir des résultats plus qualitatifs qu'une prospection classique. En effet, nous avons pu identifier, puis hiérarchiser des ZIP de manière exhaustive, et ce à l'échelle d'un département entier. Cette exhaustivité ne saurait être atteinte dans le cadre d'une prospection « classique », sur un temps de travail identique.

Cependant, nous pouvons identifier des limites à cette méthode. La première, et principale, est que certaines données ne peuvent être incluses dans un SIG, puisqu'elles n'existent pas. C'est notamment le cas des volontés politiques des mairies. Tant que la prise de contact n'a pas eu lieu avec les élus locaux, il est impossible de connaître leur position au sujet du photovoltaïque. Dans le même sens, les relations entre propriétaires et élus ne sont là aussi pas connues. Un projet sera beaucoup plus difficile (voire souvent impossible) à développer si le propriétaire du terrain est en conflit avec les élus. L'ensemble de ces informations, qui sont pourtant cruciales, ne peut être obtenu qu'après une première prise de contact, et c'est pourquoi il est impossible de les intégrer dans un SIG.

Une deuxième limite peut apparaître si on décide d'appliquer cette étude sur une zone d'étude différente. En effet, l'importance des critères retenus pour l'AMC peut varier en fonction des territoires, et les priorités de développement peuvent changer. Dans l'exemple de la Haute-

Garonne, le relief était un critère déterminant, car les Pyrénées et ses piémonts constituent un frein important à l'installation de centrales photovoltaïques. Mais dans le cas d'un département comme celui de l'Indre, sans contrainte de relief, et avec des postes de raccordement réservés au S3REnR moins nombreux et mal répartis, le poids des critères aurait été différent.

Des pistes d'amélioration de la méthodologie peuvent donc être envisagées. La suite de ce stage sera consacrée à la réalisation d'une matrice de dérisquage automatisée. Cette matrice aura pour objectif de répondre à la question suivante : quel est le niveau de risque pris si le choix d'implantation d'une centrale solaire est décidé sur cette zone ? Pour y répondre, la matrice sera réalisée avec la même méthodologie que celle employée dans ce mémoire. Elle sera cependant déclinée pour chaque agence de QENERGY en fonction des exigences, et comportera plus de critères.

Références bibliographiques

- Chakhar, C. (2006). *Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique*. D.F.R. Sciences des organisations, Université Paris Dauphine.
- Chrisman, N. (2002). *Exploring geographic information systems*. John Wiley & Sons
- Commission de Régulation de l'Énergie. 2021, juin. Rapport d'activités 2021.
- Commission de Régulation de l'Énergie. 2022, novembre. Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire « Centrales au sol ».
- Commune de Lécussan. 2018, décembre. Règlement écrit du PLU de Lécussan.
- Conseil départemental de la Haute-Garonne. 2021, juin. Les paysages haut-garonnais : éléments de compréhension.
- Deseau, J. (2021). *Solaire photovoltaïque : Peut-on envisager une implantation au Nord des panneaux ?* Chambre d'agriculture du Loiret.
- Donnay, J.P. (2005). Les « systèmes d'information géographique » (SIG). Préliminaires à un usage dans l'enseignement. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 45.
- Foote, K.E., Lynch, M. (1996). Geographic information systems as an integrating technology : Context, concepts and definitions. Department of Geography, University of Texas at Austin.
- Grimshaw, D.J. (1994). *Bringing geographical information systems into business*. Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex, England.
- Laxague, L. (2022). Centrale solaire - note technique ingénierie [non publié]. QENERGY France.
- Loi n°2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité
- Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte
- Loi n°2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat.
- Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis : A critical overview. *Progress in Planning*, 62.
- Ministère de la transition écologique et solidaire. 2020, mars. Stratégie nationale bas carbone.
- Ministère de la transition écologique et solidaire. 2020, avril. Stratégie française pour l'énergie et le climat, Programmation pluriannuelle de l'énergie, 2019 – 2023, 2024 – 2028.
- Nations Unies. 2015, décembre. Accord de Paris.
- Nobre, A., Pacheco, M., Jorge, R., Lopes, M.F.P., Gato, LMC. (2009). «Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment». *Renewable Energy*, 34.
- Observatoire des énergies renouvelables. 2022, octobre. Étude 2022 du marché français solaire thermique collectif et des très grandes installations.

- Piton, G., Philippe, F., Tacnet, J. & Gourhand, A. (2018). Aide à la décision par l'application de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) à l'analyse multicritère des stratégies d'aménagement du Grand Bûech à la Faurie. *Sciences Eaux & Territoires*, 26
- Polombo, N. (2009). *Les paysages de l'énergie : Aide à la décision pour l'implantation d'unités photovoltaïques dans le PNR du Haut-Languedoc*. Parc naturel régional du Haut-Languedoc.
- Pujol, S. (2016, mars). Panorama de la Haute-Garonne : Dynamisme démographique et économique. *Insee Analyses*, 9.
- Rakotoarivelo, J.B. (2015). *Analyse comparative de methodes multicriteres d'aide a la decision pour le secteur financier*. Université Paul Sabatier de Toulouse.
- Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, Paris.
- Roy, B. (1990). Decision-aid and decision-making. *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*.
- RTE. (2022, février). Futurs énergétiques 2050 – rapport complet.
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw Hill.
- Tornero, M. (2013, janvier). Regards sur la Haute-Garonne - Panorama du département. *Regards sur*, 30-31.
- Vazquez, R., De Lourdes, M. (2013). *Développement énergétique par modélisation et intelligence territoriale : un outil de prise de décision participative pour le développement durable des projets éoliens*. Département de mathématiques, informatique et génie, Université du Québec à Rimouski.

Liste des tables

Table des figures

Figure 1 : Implantation de QENERGY en France © Tom Godichon, 2023	2
Figure 2 : Zone de prospection de l'agence de Toulouse © Tom Godichon, 2023	3
Figure 3 : Ensemble des phases d'un projet © Tom Godichon, 2023	3
Figure 4 : Les scénarios de mix de production à l'horizon 2050 en France © RTE, 2021	8
Figure 5 : Localisation du département de la Haute-Garonne © Tom Godichon, 2023	12
Figure 6 : Topographie du département de la Haute-Garonne © Tom Godichon, 2023	13
Figure 7 : Parcelles déclarées à la PAC dans le département de la Haute-Garonne en 2021 © Tom Godichon, 2023	17
Figure 8 : Parcelles agricoles admissibles au cas 2 bis de l'appel d'offre AO PPE2 PV de la CRE © Tom Godichon, 2023	18
Figure 9 : Zones d'implantation potentielle de centrales solaires dans le département de la Haute-Garonne © Tom Godichon, 2023	21
Figure 10 : Méthodologie de l'analyse multicritère © Tom Godichon, 2023	22
Figure 11 : Distance normalisée aux postes de raccordement © Tom Godichon, 2023	24
Figure 12 : Distance normalisée aux axes routiers majeurs © Tom Godichon, 2023	25
Figure 13 : Les 8 étapes de l'AHP de Saaty © Tom Godichon, 2023. D'après Rakotoarivelo, 2015... ..	26
Figure 14 : Matrice normalisée (exposition) © Tom Godichon, 2023	26
Figure 15 : Vérification de la cohérence de la pondération par le calcul du ratio de cohérence © Tom Godichon, 2023	27
Figure 16 : Matrice de jugement de l'AMC inter-critères © Tom Godichon, 2023	27
Figure 17 : Niveau de contrainte au développement de projets PV au sol dans le département de la Haute-Garonne © Tom Godichon, 2023	29
Figure 18 : Niveau de contrainte moyen par parcelle © Tom Godichon, 2023	30
Figure 19 : Localisation des deux parcelles identifiées comme les plus favorables © Tom Godichon, 2023	31
Figure 20 : Localisation de la ZIP de Lécussan © Tom Godichon, 2023	32

Table des annexes

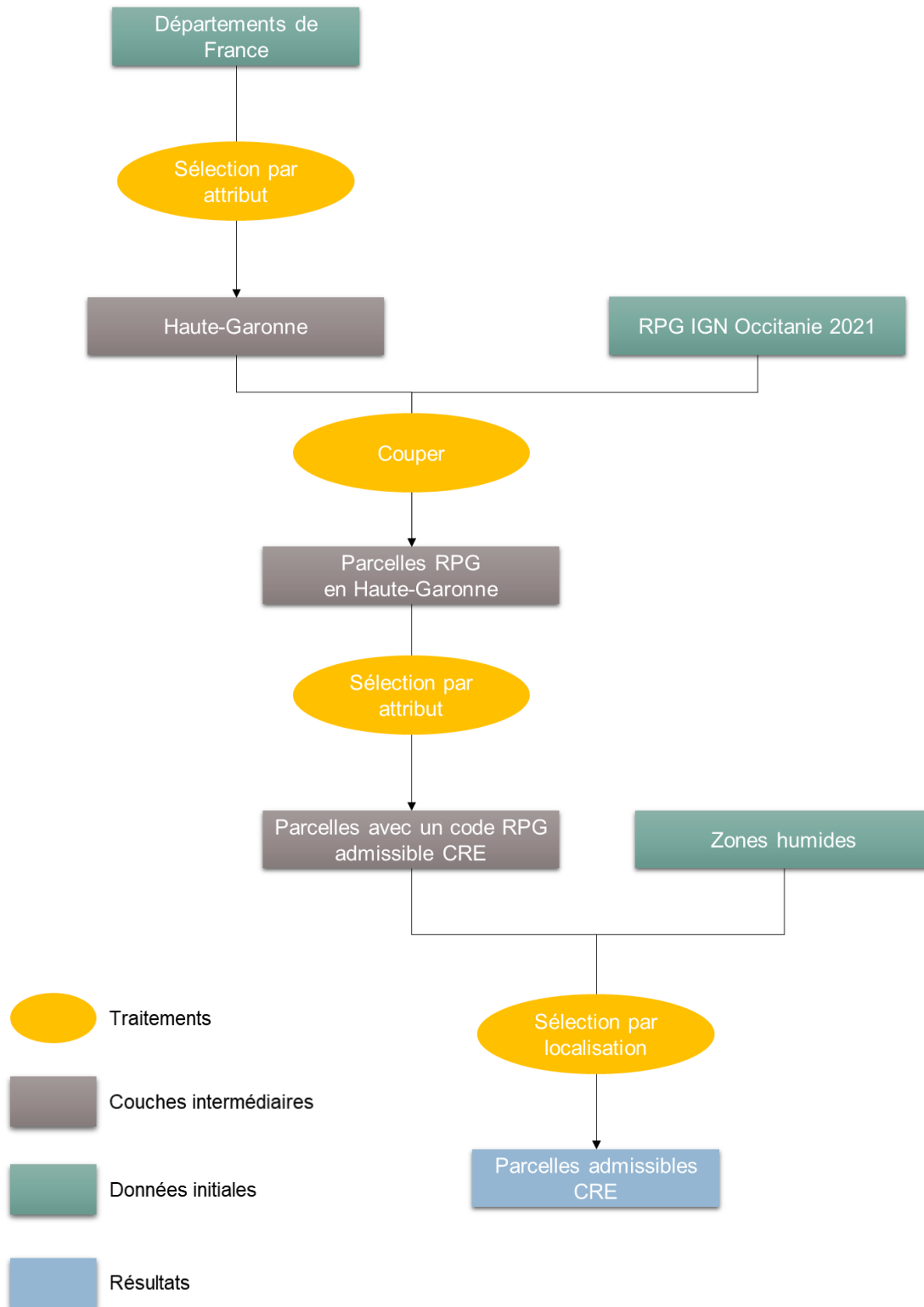
Annexe A : Méthodologie de sélection des parcelles admissibles à la CRE © Tom Godichon, 2023 ..	40
Annexe B : Sélection des parcelles hors zonages environnementaux. © Tom Godichon, 2023	41
Annexe C : Sélection des parcelles situées à plus de 500m des zones à fort enjeu paysager. © Tom Godichon, 2023	42
Annexe D : Sélection des parcelles en fonction du relief © Tom Godichon, 2023	43
Annexe E : Calcul de la distance normalisée aux postes de raccordement © Tom Godichon, 2023	44
Annexe F : Calcul de la distance normalisée aux axes routiers majeurs © Tom Godichon, 2023	45
Annexe G : Matrice de jugement du critère Exposition © Tom Godichon, 2023	46
Annexe H : Matrice normalisée de l'AMC générale © Tom Godichon, 2023	46
Annexe I : Localisation du poste de la Gentille © Tom Godichon, 2023	47
Annexe J : Localisation du poste de Cazaril © Tom Godichon, 2023	48

Table des matières

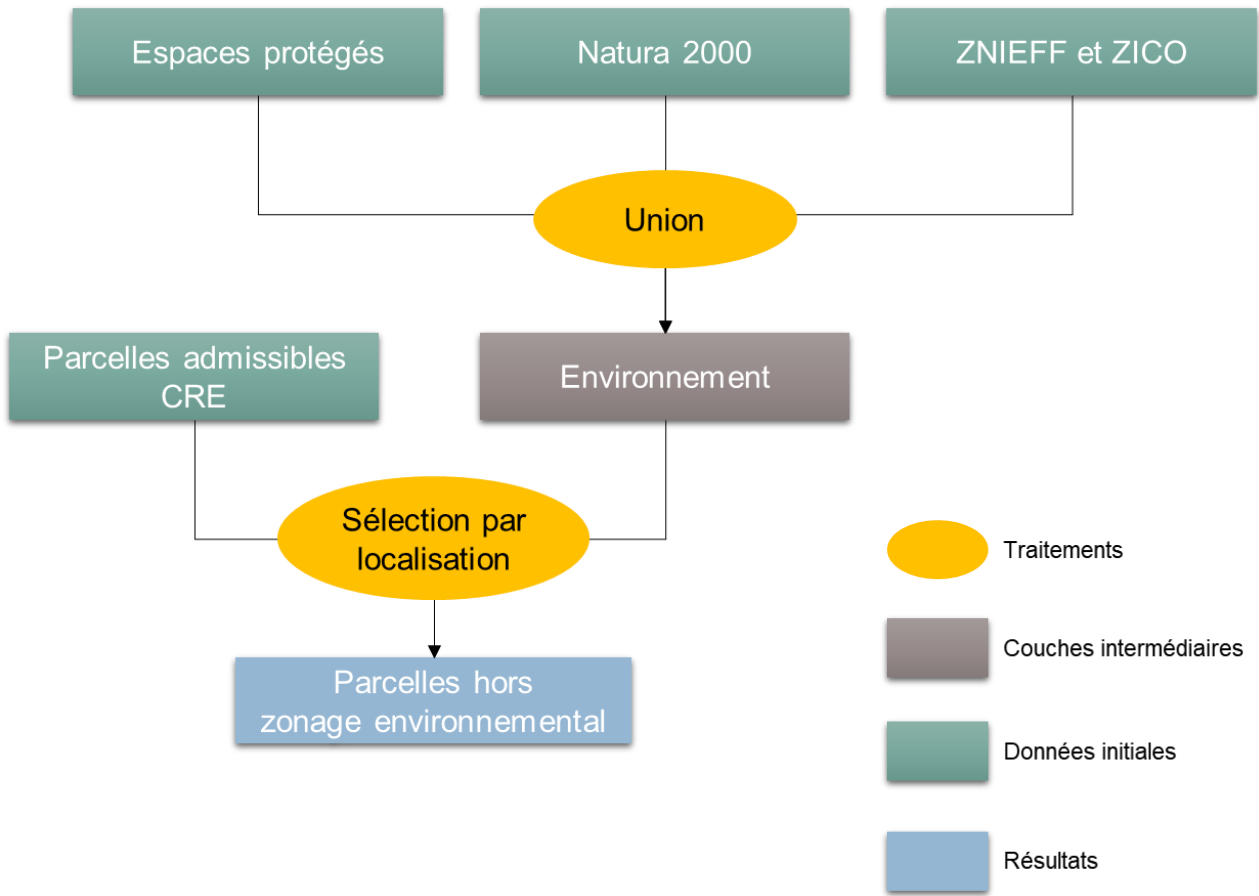
Résumé	ii
Remerciements	iii
Sommaire	iv
Sigles et acronymes	v
Introduction	1
1. État de l'art	5
1.1. La place du solaire photovoltaïque dans le mix énergétique français	5
1.2. La technologie du solaire photovoltaïque : aspects techniques	8
1.3. Les SIG et la prospection	9
1.4. Zone d'étude : le département de la Haute-Garonne	11
2. Données et méthodologie	14
2.1. Données mobilisées	14
2.1.1. Topographie, environnement et agriculture	14
2.1.2. Administratif	14
2.1.3. Monuments et paysages	14
2.1.4. Servitudes et réseaux	15
2.2. Méthodologie de prospection	15
2.2.1. Identification des terrains admissibles aux appels d'offre de la Commission de Régulation de l'Énergie	15
2.2.2. Localisation des zones d'implantations potentielles	19
2.2.3. Hiérarchisation des ZIP : analyse multicritère	22
3. Résultats	29
Conclusion, limites et perspectives	34
Références bibliographiques	36
Liste des tables	38
Table des figures	38
Table des annexes	38
Table des matières	39
Annexes	40

Annexes

Annexe A : Méthodologie de sélection des parcelles admissibles à la CRE © Tom Godichon, 2023

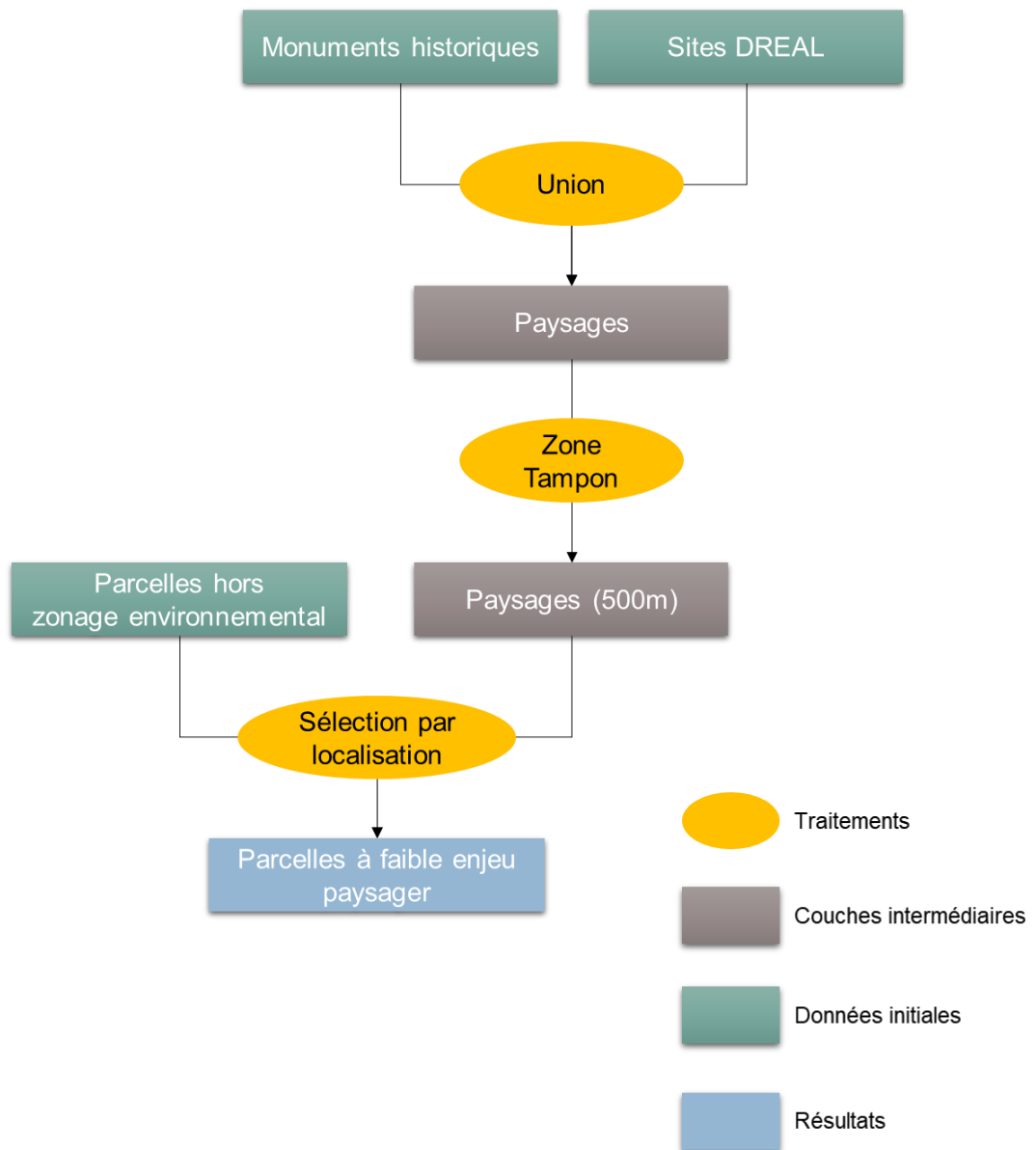


Annexe B : Sélection des parcelles hors zonages environnementaux.
© Tom Godichon, 2023



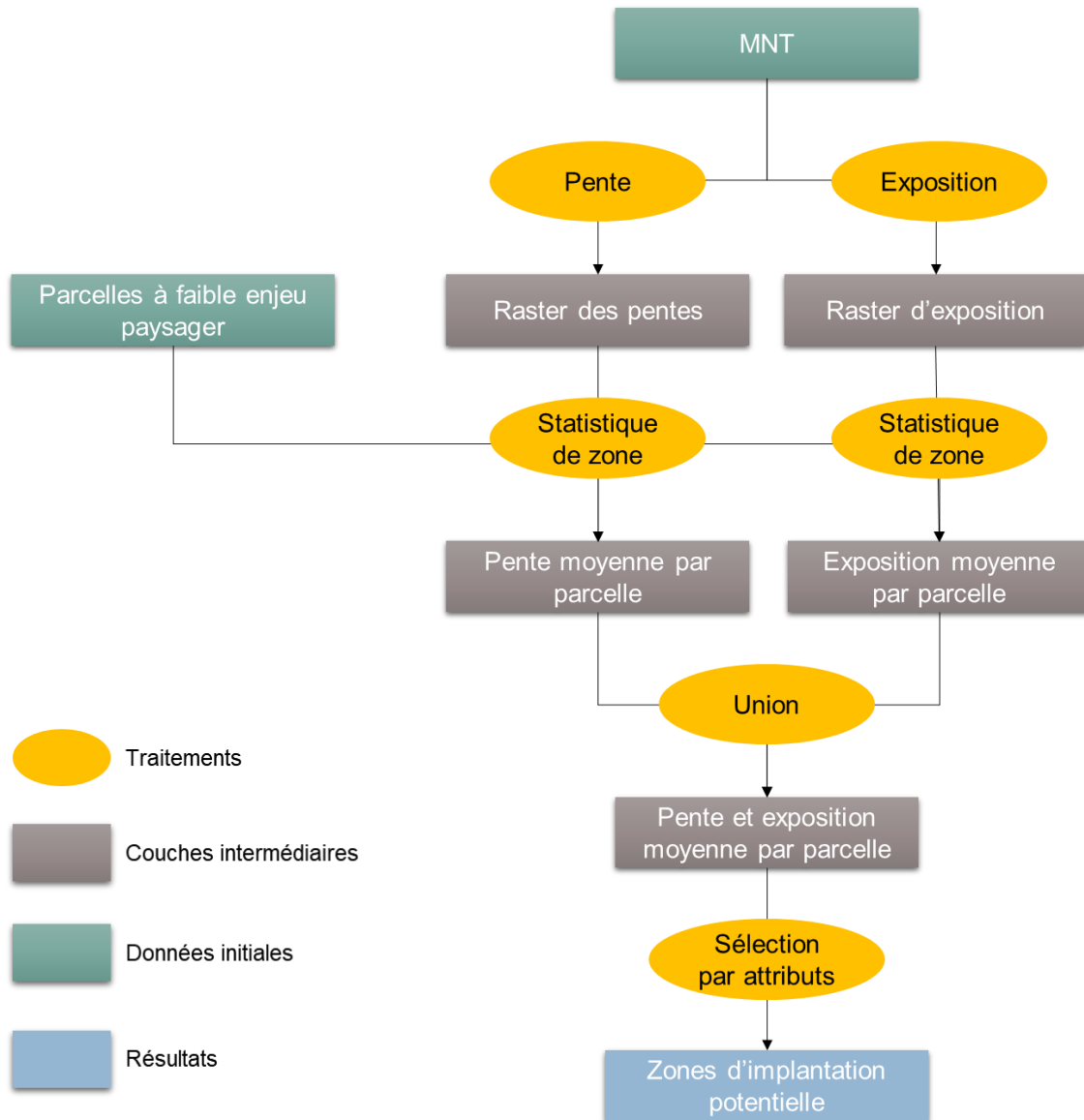
© Tom Godichon, 2023

Annexe C : Sélection des parcelles situées à plus de 500m des zones à fort enjeu paysager.
© Tom Godichon, 2023



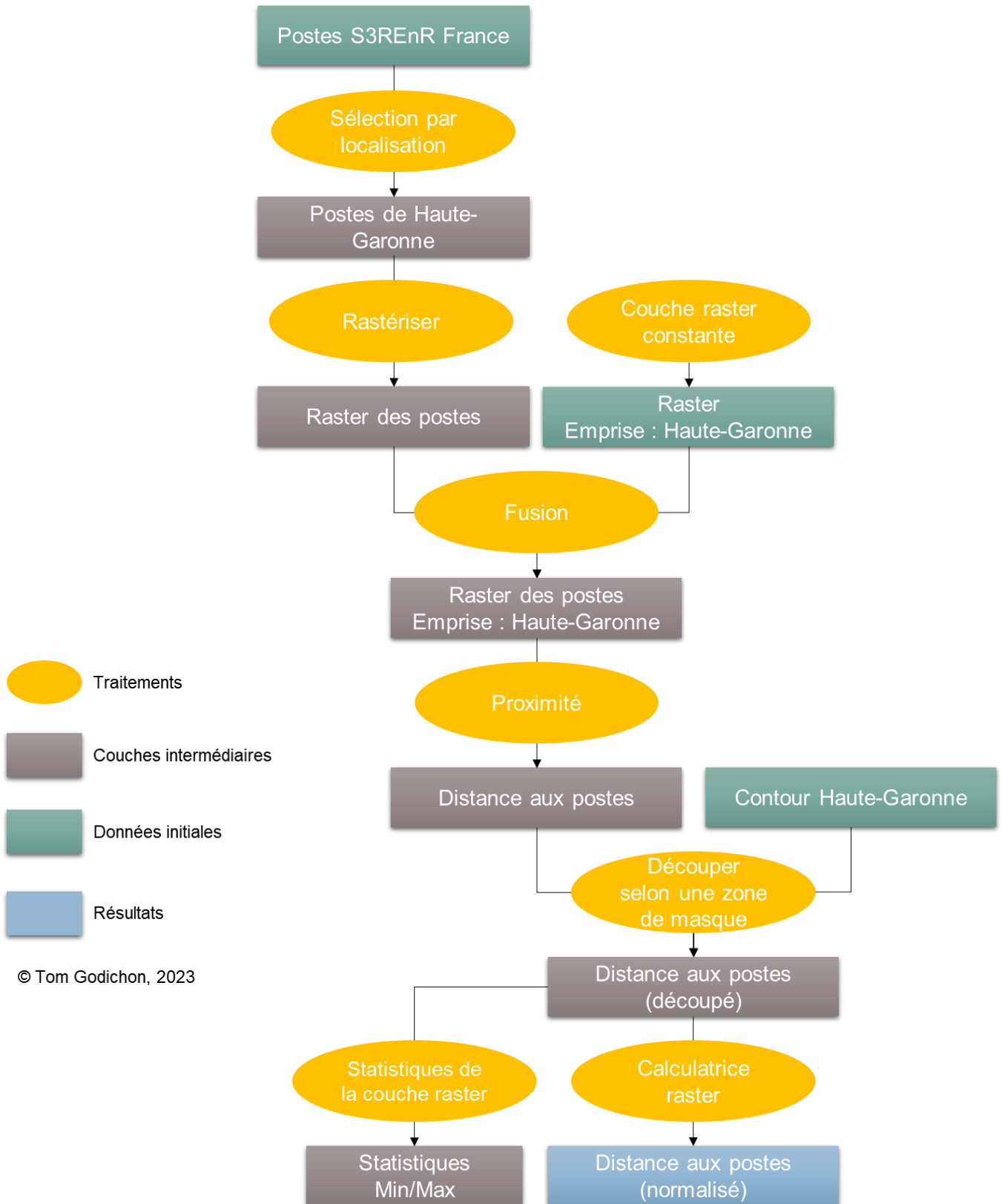
© Tom Godichon, 2023

Annexe D : Sélection des parcelles en fonction du relief
© Tom Godichon, 2023

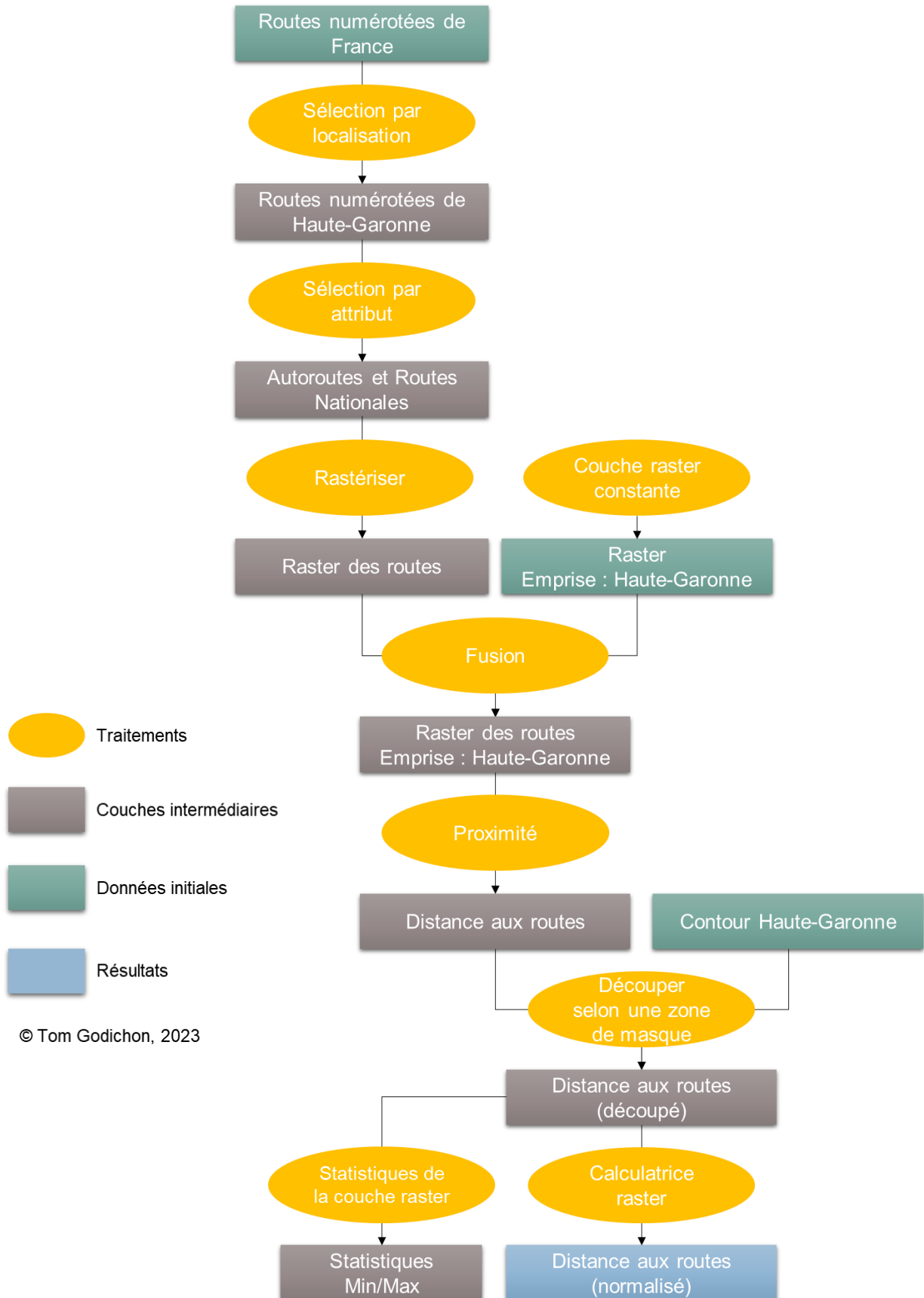


© Tom Godichon, 2023

Annexe E : Calcul de la distance normalisée aux postes de raccordement
© Tom Godichon, 2023



Annexe F : Calcul de la distance normalisée aux axes routiers majeurs
 © Tom Godichon, 2023



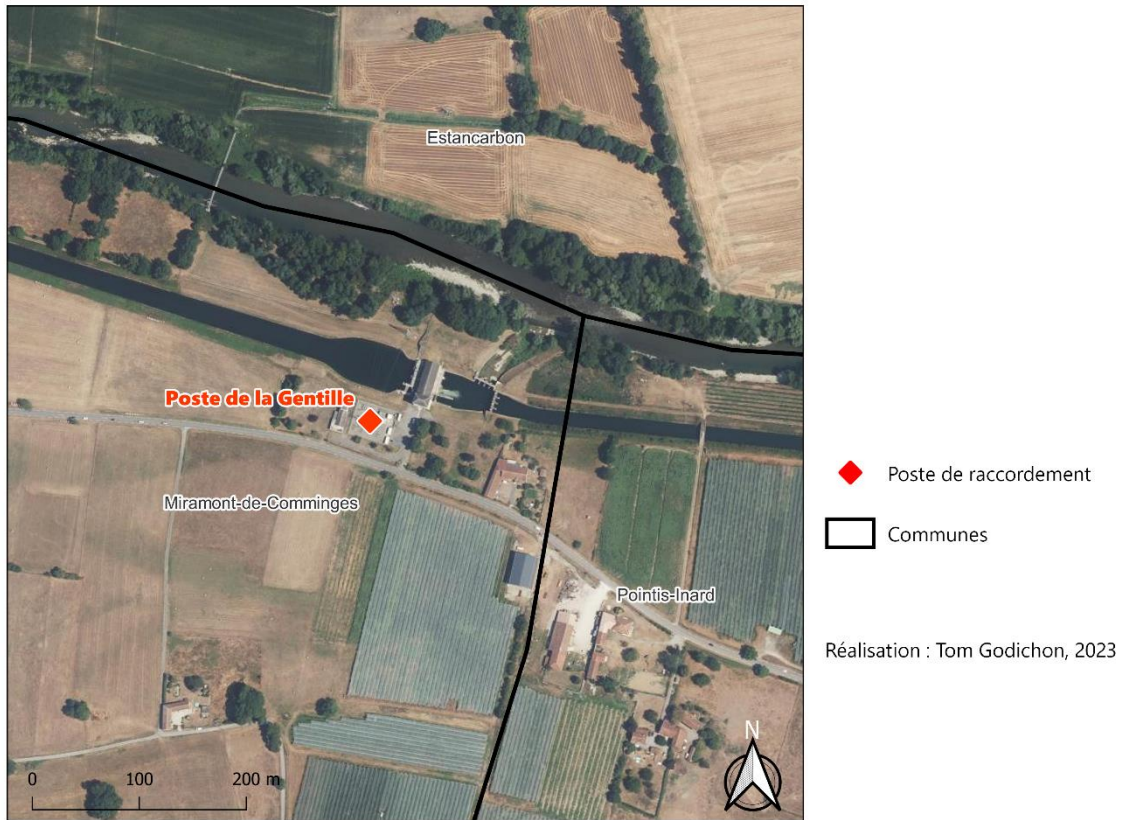
Annexe G : Matrice de jugement du critère Exposition
© Tom Godichon, 2023

Matrice de jugement				
	Sud	Ouest	Est	Nord
Sud	1	0,20	0,20	0,11
Ouest	5	1	1	0,20
Est	5	1	1	0,20
Nord	9	5	5	1
Somme	20	7,20	7,20	1,51

Annexe H : Matrice normalisée de l'AMC générale
© Tom Godichon, 2023

Matrice normalisée							
	Pente	Exposition	Raccordement	Routes	Somme	Poids	
Pente	0,05	0,02	0,06	0,06	0,20	0,05	
Exposition	0,21	0,09	0,09	0,09	0,47	0,12	
Raccordement	0,37	0,44	0,43	0,43	1,67	0,42	
Routes	0,37	0,44	0,43	0,43	1,67	0,42	
Somme	1	1	1	1	4	1	

Annexe I : Localisation du poste de la Gentille
© Tom Godichon, 2023



Annexe J : Localisation du poste de Cazaril
© Tom Godichon, 2023

