

Berton Driss

Logiques d'implantation spatiale des  
panneaux photovoltaïques au sol en région  
Provence-Alpes-Côte d'Azur

Encadré par : Laure Casanova Enault,  
maître de conférences en géographie



## Sommaire

<b>Introduction .....</b>	4
Contexte .....	4
Problématique de recherche.....	4
Plan .....	5
Méthode.....	6
<b>1 Photovoltaïque au sol en PACA : cadrage réglementaire, tensions foncières et enjeux territoriaux.....</b>	7
1.1 Un renforcement du Cadre Législatif pour la Transition Énergétique et l'Accélération des Énergies Renouvelables .....	7
1.2 Une difficile conciliation entre objectifs de transition énergétique et de sobriété foncière.....	7
1.3 Un enjeu de prise en compte du paysage énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur .....	8
1.4 Une intégration en cours du photovoltaïque au sol dans les documents d'urbanisme .....	8
1.5 Limites des Zones d'Accélération pour les Énergies Renouvelables .....	9
1.6 Une évolution du cadre législatif et réglementaire du photovoltaïque au sol avec la création des ZAER.....	11
1.7 Les enjeux de la transition énergétique en région PACA : un focus sur le photovoltaïque .....	13
<b>2. Élaboration d'une analyse multicritère pour l'identification des zones favorables à l'implantation photovoltaïque en PACA.....</b>	17
2.1 L'élaboration d'une méthode de caractérisation du potentiel d'installation du photovoltaïque au sol.....	17
2.2 La combinaison des données et des indicateurs pour la carte multicritère .....	19
2.3 Les géographies différencierées des critères d'évaluation du potentiel d'implantation du photovoltaïque au sol.....	24
2.4 Élaboration de scénarios théoriques : variation des pondérations des critères ...	44
<b>3. Confrontation du potentiel théorique avec les projets d'implantation de photovoltaïque au sol engagés .....</b>	53
3.1 Analyse statistique de la correspondance entre les résultats de l'analyse multicritères et les permis délivrés.....	53

3.2 Analyse cartographique de la correspondance entre les notes multicritères et les permis délivrés .....	57
<b>4 Identification des critères déterminants pour l'obtention des permis photovoltaïques sur une parcelle : analyse par régression logistique .....</b>	<b>60</b>
4.1 Caractérisation descriptive des parcelles avec permis photovoltaïque .....	60
4.2 Comparaison des critères selon la présence ou absence de permis .....	67
4.3 L'apport d'un modèle logistique pour l'analyse des facteurs influençant la présence de permis photovoltaïque au sol dans la région PACA .....	75
4.4 Conclusion statistique sur les déterminants de l'implantation du photovoltaïque au sol en région PACA.....	86
<b>Conclusion.....</b>	<b>87</b>
<b>Bibliographie : .....</b>	<b>91</b>
<b>Table des illustrations : .....</b>	<b>94</b>
Graphiques .....	94
Cartes .....	95
Tableaux.....	96
Schéma .....	96

## **Introduction**

### **Contexte**

Face à l'urgence climatique et à la nécessité de décarboner le mix énergétique, la France s'est engagée dans une transition énergétique profonde, accélérée par l'adoption de plusieurs lois clés depuis la décennie 2010. Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque apparaît comme une filière stratégique, conjuguant maturité technologique, modularité et fort potentiel de production, notamment dans les régions les plus ensoleillées du territoire.

Parmi elles, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) se distingue par un gisement solaire exceptionnel. Toutefois, elle concentre également de fortes tensions foncières et paysagères, du fait d'une concurrence entre usages agricoles, résidentiels, touristiques et environnementaux. Le développement du photovoltaïque au sol s'inscrit ainsi au croisement de logiques parfois contradictoires : ambitions nationales de neutralité carbone, préservation des terres agricoles et naturelles, acceptabilité locale et cohérence des documents d'urbanisme.

L'émergence des Zones d'Accélération pour les Énergies Renouvelables (ZAER), introduites par la loi APER de 2023, reflète cette volonté de territorialiser les objectifs de transition, en s'appuyant sur une démarche de coordination multi-niveaux entre l'État, les collectivités locales et les porteurs de projets. Toutefois, bien qu'elles constituent un tournant récent et stratégique, les ZAER ne seront pas au centre de cette analyse. Leur mise en œuvre effective étant encore très récente, les données ne sont pas encore mobilisable pour une évaluation rigoureuse. De plus, ces zonages posent plusieurs limites : forte disparité des ressources entre communes, caractère encore indicatif des périmètres définis, et incertitude quant à leur traduction en projets concrets.

C'est pourquoi ce travail privilégie l'étude des implantations déjà autorisées via permis de construire, qui constituent un socle empirique tangible. L'objectif est de confronter ces implantations réelles à un modèle multicritère combinant des critères techniques (pente, ensoleillement, proximité aux réseaux) et environnementaux (occupation du sol, statut foncier), afin d'évaluer dans quelle mesure les projets réalisés s'inscrivent dans une logique d'optimisation territoriale ou, au contraire, s'en écartent.

### **Problématique de recherche**

Malgré un potentiel solaire particulièrement élevé et des outils de planification de plus en plus structurés, de nombreuses parcelles théoriquement favorables à l'implantation de centrales photovoltaïques au sol en région PACA restent inexploitées. À l'inverse, certains sites, parfois contraints, concentrent un grand nombre de projets autorisés.

Cette situation soulève une interrogation : quels sont les facteurs, et critères déterminants qui orientent réellement les choix d'implantation des projets photovoltaïques au sol en région PACA ?

Au-delà des critères techniques et environnementaux modélisés dans l'analyse multicritère, des logiques foncières, économiques, réglementaires ou sociales peuvent influencer les décisions des porteurs de projets.

Pour répondre à cette question, cette analyse adopte une démarche en deux temps :

- D'une part, il s'agit d'analyser les zones où se concentrent les permis de construire accordés, afin d'identifier les caractéristiques communes des sites effectivement retenus.
- D'autre part, une comparaison est menée avec les zones à fort potentiel théorique identifiées par une analyse multicritère régional, mais non exploitées en pratique.

Ce croisement entre réalité observée et potentiel théorique permet de mettre en lumière les écarts entre planification et réalisation, et d'identifier les facteurs clés qui freinent ou facilitent l'implantation de projets solaires au sol dans un contexte territorial sous contrainte.

## Plan

Afin de répondre à cette problématique, ce mémoire s'articule en quatre grandes parties. La première partie pose le cadre territorial, réglementaire et foncier dans lequel s'inscrit le développement du photovoltaïque au sol en région PACA. Elle revient sur les objectifs nationaux de transition énergétique, les instruments d'aménagement et de planification mis en place (tels que les ZAER), ainsi que les tensions d'usage du sol spécifiques à cette région.

La deuxième partie présente la méthodologie retenue pour construire une analyse multicritère spatiale du potentiel d'implantation de photovoltaïque au sol dans la région PACA. Elle détaille les critères sélectionnés (pente, ensoleillement, occupation du sol, proximité aux réseaux...), leur pondération, et la construction du raster multicritère permettant d'identifier les zones théoriquement favorables à l'implantation de centrales photovoltaïques.

La troisième partie confronte ce modèle théorique aux données d'implantation réelles, issues des permis de construire. Cette confrontation permet de repérer les zones effectivement exploitées, celles qui restent en marge malgré leur potentiel, et d'en tirer une première lecture critique des écarts entre logique planifiée et logique opérée.

Enfin, la quatrième partie approfondit cette analyse à l'aide d'une régression logistique visant à identifier les critères les plus déterminants dans l'obtention des permis. Cette approche statistique permet de quantifier le poids de chaque facteur dans la probabilité qu'une parcelle soit effectivement retenue pour un projet photovoltaïque, et ainsi de mieux cerner les logiques concrètes de sélection à l'œuvre dans les dynamiques d'implantation.

## Méthode

Afin de répondre à cette problématique, une méthodologie en plusieurs étapes a été mise en œuvre, combinant analyse spatiale et modélisation statistique.

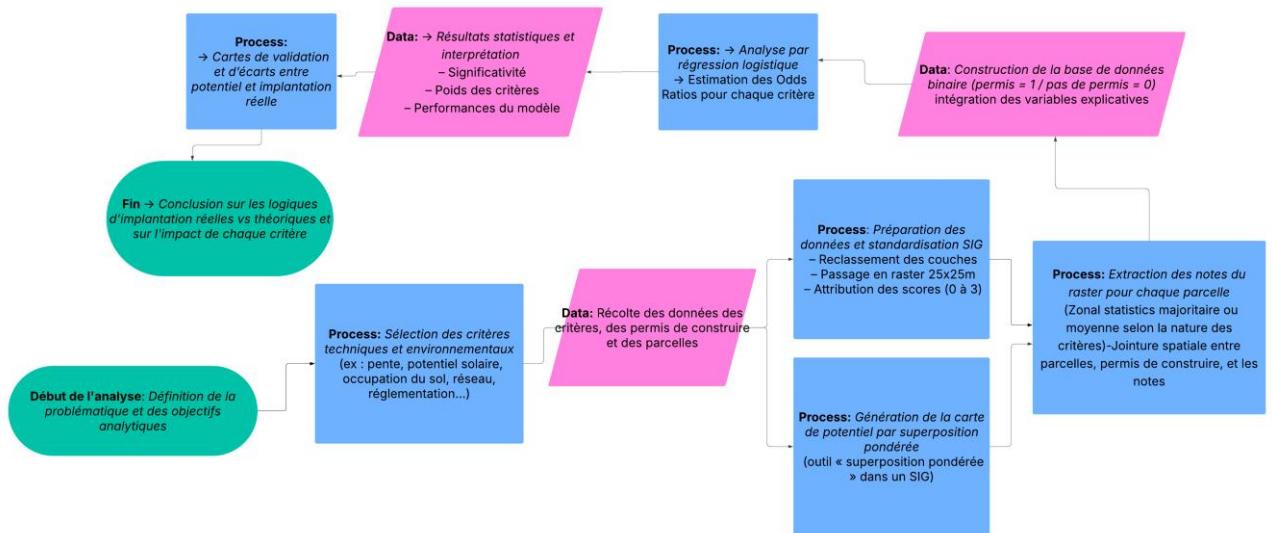


Schéma 1 : Workflow de la méthodologie

Après avoir défini les objectifs de l'étude, les principaux critères techniques et environnementaux susceptibles d'influencer l'implantation des centrales photovoltaïques au sol ont été sélectionnés : pente, ensoleillement, occupation du sol, proximité aux réseaux, accessibilité routière et pression réglementaire. Ces critères ont été reclassés sous forme raster avec une grille de notation allant de 0 (exclusion) à 3 (très favorable), puis agrégés au sein d'une carte multicritère construit dans un SIG.

La carte de potentiel régional a ainsi été produite, permettant d'identifier les zones théoriquement propices à l'implantation. À partir de cette carte, des valeurs de potentiel (les notes) ont été extraites à l'échelle des parcelles cadastrales et croisées avec les données réelles de permis de construire.

Cela a permis de construire une base binaire (permis / pas de permis) exploitée ensuite dans un modèle de régression logistique. Cette modélisation a permis d'identifier les critères ayant un impact significatif sur la probabilité d'implantation d'un projet photovoltaïque. Enfin, une carte de validation a été réalisée pour confronter le potentiel théorique aux implantations effectives, permettant d'analyser les écarts et de discuter les logiques d'aménagement à l'œuvre. Ce protocole analytique, croisant approche spatiale et statistique, vise à éclairer les déterminants concrets de l'implantation des projets dans la région PACA.

## **1 Photovoltaïque au sol en PACA : cadrage réglementaire, tensions foncières et enjeux territoriaux**

### **1.1 Un renforcement du Cadre Légal pour la Transition Énergétique et l'Accélération des Énergies Renouvelables**

Depuis les années 2010, la France a progressivement renforcé son cadre législatif pour répondre aux impératifs climatiques et aux objectifs de transition énergétique fixés à l'échelle nationale et européenne. La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) de 2015 a marqué un tournant, avec des objectifs ambitieux comme l'augmentation de la part des énergies renouvelables (ENR) à 32 % de la consommation finale d'énergie d'ici 2030 et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) de 40 % sur la même période. Ces objectifs ont été complétés par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et les engagements pris lors de l'Accord de Paris (COP21), fixant la neutralité carbone d'ici 2050.

En parallèle, la Loi Énergie-Climat de 2019 a renforcé ces ambitions en intégrant des mesures pour accélérer le déploiement des infrastructures ENR. Enfin, la Loi Climat et Résilience de 2021 a consolidé le cadre réglementaire pour atteindre ces objectifs tout en essayant de répondre aux enjeux d'aménagement durable, en particulier à travers des outils comme la loi Zéro Artificialisation Nette (ZAN).

C'est dans ce contexte que la Loi d'Accélération de la Production des Énergies Renouvelables (APER) a été adoptée en mars 2023. Elle introduit notamment les Zones d'Accélération pour les Énergies Renouvelables (ZAER), un dispositif clé pour simplifier les procédures administratives et orienter les projets ENR vers des zones stratégiques, tout en maximisant les retombées économiques locales. Ce cadre répond à la nécessité de développer rapidement des infrastructures de production renouvelable tout en réduisant les tensions sociales et environnementales.

### **1.2 Une difficile conciliation entre objectifs de transition énergétique et de sobriété foncière**

De plus ces politiques et réglementations récemment mises en avant en France se heurtent également à d'autres réglementations ayant pourtant un objectif assez similaire (préservation de l'environnement et réduction des gaz à effet de serre) comme le ZAN mentionné juste avant par exemple. En effet, la politique du Zéro Artificialisation Nette (ZAN), inscrite dans la Loi Climat et Résilience de 2021, prévoit dans un premier temps un ralentissement significatif de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF), puis vise, à terme, l'interdiction totale de leur artificialisation nette. Ainsi, cette politique encourage une sobriété foncière tout en répondant aux impératifs de développement durable. Cependant, l'essor des énergies renouvelables (ENR) constitue également une priorité majeure du développement durable. En effet, ces énergies contribuent directement à plusieurs des 17 Objectifs de Développement Durable (ODD) adoptés par l'ONU en 2015 dans le cadre de l'Agenda 2030, en particulier ceux liés à la lutte contre le changement climatique, à l'accès à une énergie propre et abordable, et à la préservation des ressources naturelles.

Cela entraîne donc certains enjeux territoriaux et une certaine contradiction car d'un côté on demande d'augmenter la production d'énergies renouvelables ce qui va donc impliquer l'installation d'infrastructures adéquates et donc impliquer de nouvelles formes d'artificialisations et d'un autre côté, moins artificialiser en prônant la sobriété foncière. Ainsi la nouvelle problématique pour les territoires en France va être de concilier le développement d'énergie renouvelables sur leur territoire avec les enjeux de sobriété foncière qu'implique le ZAN.

### **1.3 Un enjeu de prise en compte du paysage énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur**

Ces tensions se matérialisent notamment à travers le concept de paysage énergétique, concept proposé par des géographes comme Martin Pasqualetti ou Stefan Stremke, qui illustre les interactions entre infrastructures renouvelables et territoires. En effet la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) est à la croisée des enjeux de transition énergétique et de préservation de son riche patrimoine paysager. Le développement des infrastructures photovoltaïques, essentiel pour répondre aux objectifs climatiques, modifie les dynamiques territoriales en transformant les paysages naturels et agricoles. Ces évolutions suscitent des tensions croissantes, exacerbées par les contraintes imposées par la politique de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) et la diversité des usages des sols.

Ce concept, qui met en avant la cohabitation entre les infrastructures énergétiques et les valeurs naturelles et culturelles des territoires, offre un cadre pertinent pour analyser ces enjeux. En PACA, cette perspective révèle certaines contradictions. En effet malgré un potentiel solaire exceptionnel, les projets photovoltaïques suscitent des résistances locales en raison de leur impact visuel et des conflits d'usage qu'ils génèrent. Ces résistances soulignent l'importance de repenser l'intégration de ces infrastructures dans les territoires.

Une approche innovante consisterait à concevoir les projets photovoltaïques comme des "projets de paysage", conciliant production d'énergie et respect des caractéristiques territoriales. En PACA, des initiatives comme l'agrivoltaïsme, qui associe production énergétique et maintien des activités agricoles, ou l'implication des populations locales dans les processus de planification, pourraient permettre de réduire ces tensions. Ces démarches contribueraient à articuler les ambitions énergétiques avec les impératifs de préservation paysagère, tout en répondant aux objectifs de la transition énergétique régionale.

### **1.4 Une intégration en cours du photovoltaïque au sol dans les documents d'urbanisme**

Ainsi il va être important d'analyser les espaces concernés par l'installation d'infrastructure ENR et leur statut sur la planification urbaine. Dans un premier temps l'analyse des espaces concernés par les infrastructures d'énergies renouvelables (EnR) repose sur la distinction entre trois types de surfaces :

- l'emprise totale, la surface utile dite artificialisée et la surface imperméabilisée. L'emprise totale inclut tous les espaces nécessaires à l'infrastructure, y compris les zones non artificialisées, comme les terres agricoles ou naturelles entre les mâts d'éoliennes par exemple.

- La surface utile, quant à elle, correspond uniquement à la zone directement dédiée à l'infrastructure, considérée comme artificialisée même si elle reste perméable.
- Enfin, la surface imperméabilisée se limite aux zones bétonnées ou asphaltées, comme les fondations ou les voies d'accès. Ces distinctions permettent d'évaluer précisément les impacts spatiaux et environnementaux des infrastructures, en lien avec des objectifs tels que la loi Zéro Artificialisation Nette (ZAN). Elles facilitent également une gestion plus durable des territoires en intégrant des usages multifonctionnels (agricoles, naturels ou forestiers) dans les zones concernées par les projets EnR.

Ainsi, il est essentiel de comprendre comment les panneaux photovoltaïques au sol sont considérés dans la planification urbaine, car il existe un certain flou réglementaire autour de ces infrastructures d'énergies renouvelables. Alors que les éoliennes sont clairement identifiées en termes de classification et d'impact, les panneaux photovoltaïques, en raison de leurs caractéristiques spécifiques, peuvent, selon les circonstances, ne pas être systématiquement considérés comme une artificialisation pure.

Dans certains cas le photovoltaïque au sol peut ne pas être reconnu comme de l'artificialisation « pure », cependant, dans d'autres contextes, les centrales photovoltaïques sont bien considérées comme de l'artificialisation, notamment lorsque l'installation remplace des espaces naturels, agricoles ou forestiers. Cela fait du photovoltaïque au sol la principale source potentielle de consommation de ces espaces, devant les installations de méthanisation selon l'ADEME en 2023 .

Cette situation met également en lumière des ambiguïtés réglementaires concernant les infrastructures photovoltaïques. Contrairement aux éoliennes, clairement identifiées comme des sources d'artificialisation, les panneaux photovoltaïques peuvent, selon les cas, être perçus comme compatibles avec des usages multifonctionnels ou classés comme des artificialisations pures lorsqu'ils remplacent des espaces naturels ou agricoles. Ces flous juridiques, combinés à des barrières administratives et économiques, limitent la mobilisation de friches industrielles ou agricoles, pourtant identifiées comme des terrains d'implantation privilégiés pour limiter l'impact environnemental. Ainsi, la région PACA se trouve confrontée à un double défi : concilier son rôle stratégique dans la transition énergétique et préserver ses ressources foncières et paysagères, essentielles à son identité territoriale.

De plus les scénarios "Transitions 2050" de l'ADEME estiment qu'une emprise au sol de 75 000 à 125 000 hectares sera nécessaire d'ici 2050 pour répondre aux objectifs de production d'énergie renouvelable. Cela souligne l'importance d'examiner la réglementation actuelle et son évolution, afin de déterminer dans quels cas le photovoltaïque au sol est classé comme artificialisation et dans quels autres cas il ne l'est pas.

## **1.5 Limites des Zones d'Accélération pour les Énergies Renouvelables**

Les ZAER se placent donc comme un outil particulièrement puissant pour la transition énergétique des territoires. Cependant, les ZAER, étant un outil très récent, ces zonages présentent plusieurs limites en tant qu'instrument d'aide à la décision ou de compréhension des logiques d'implantation spatiale des panneaux photovoltaïques.Une des problématiques

majeures est que certaines communes ne disposent pas toujours des compétences techniques ou des ressources nécessaires pour identifier de manière optimale les ZAER sur leur territoire. Malgré cela, elles peuvent être incitées, voire contraintes, à désigner ces zones de manière autonome, notamment en raison du cadre législatif introduit par la loi APER. Cette dernière s'inscrit en effet dans une logique de renforcement de la décentralisation récente, initiée dès les lois Defferre (1982-1983), puis renforcée par la loi NOTRe (2015), laquelle précise et étend les responsabilités territoriales sur les questions économiques et environnementales.

Cette décentralisation, bien qu'offrant davantage d'autonomie aux collectivités, peut se révéler problématique pour les communes les moins équipées sur le plan technique ou financier. Faute de moyens suffisants ou de compétences spécialisées, certaines collectivités risquent de désigner des ZAER qui ne respectent pas toutes les conditions nécessaires à l'installation de panneaux photovoltaïques, comme l'accès aux infrastructures énergétiques ou le respect des critères environnementaux par exemple.

Dans ces cas, la charge de vérifier la faisabilité des projets dans ces zones retombe principalement sur les porteurs de projets privés, qui devront évaluer si les sites identifiés sont viables ou non. Cela va à l'encontre de l'objectif initial des ZAER, qui consiste à offrir des zones prédéfinies et adaptées pour le développement des énergies renouvelables, réduisant ainsi les délais et les obstacles réglementaires. En somme, cette situation pourrait ralentir la mise en œuvre de certains projets et limiter l'efficacité globale des ZAER en tant qu'outil stratégique pour la transition énergétique.

Bien que les ZAER soient conçus comme des outils stratégiques pour guider l'implantation des projets d'énergies renouvelables, leur efficacité est limitée par leur caractère indicatif et la variabilité des ressources techniques des communes pour définir ces zones. En réalité, ce sont souvent les porteurs de projets qui jouent un rôle déterminant dans le choix final des sites d'implantation. Ces derniers se basent sur des critères techniques et économiques spécifiques, tels que les orientations fournies par la DREAL et les DDT, les exigences des cahiers des charges des appels d'offres de la CRE (commission de régulation de l'énergie), les tarifs de rachat de l'électricité produite, ainsi que les contraintes des documents d'urbanisme locaux comme les PLU et les SCoT.

Ils évaluent aussi minutieusement la viabilité des zones désignées comme ZAER en fonction de facteurs concrets, tels que la proximité aux infrastructures énergétiques (réseaux électriques, postes de transformation), l'exposition solaire, et les coûts d'aménagement. Ils doivent également prendre en compte les risques environnementaux et sociaux, souvent détectés au cours des évaluations imposées par les appels d'offres. Ainsi, une zone identifiée comme ZAER peut être jugée inadaptée ou non rentable par un investisseur si elle ne répond pas à ces critères.

Cela souligne l'importance d'étudier directement les logiques décisionnelles des porteurs de projets, plutôt que de s'appuyer exclusivement sur l'analyse des ZAER. Comprendre ces critères permet de mieux cerner les dynamiques d'implantation spatiale des panneaux photovoltaïques, qui reposent sur un équilibre entre opportunités locales et rentabilité pour les investisseurs.

## **1.6 Une évolution du cadre législatif et réglementaire du photovoltaïque au sol avec la création des ZAER.**

Historiquement, les installations photovoltaïques au sol étaient souvent intégrées dans des zones dites NH (zones naturelles ou semi-naturelles) des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU), ce qui entraînait des conflits d'usage et des oppositions sociales. De plus comme mentionné avant les installations photovoltaïques au sol soulèvent une question complexe en matière d'artificialisation des sols. La réglementation établit une distinction cruciale basée sur l'usage possible du terrain. Sur les surfaces dites "utiles", c'est-à-dire exclusivement dédiées à l'infrastructure photovoltaïque, les panneaux sont considérés comme de l'artificialisation, même si le sol n'est pas imperméabilisé. En revanche, lorsque l'installation permet le maintien d'usages naturels, agricoles ou forestiers (NAF), comme dans le cas de l'agrivoltaïsme où les cultures peuvent se poursuivre sous les panneaux, ou lorsque l'espacement entre les structures autorise la préservation des fonctions écologiques du sol, l'infrastructure peut échapper à cette classification. Seules les surfaces effectivement imperméabilisées, telles que les fondations et les voies d'accès asphaltées, sont systématiquement comptabilisées comme artificialisées. Cette approche nuancée reflète la volonté de concilier le développement des énergies renouvelables avec la préservation des terres agricoles et naturelles.

On peut également identifier la production, la consommation ainsi que le potentiel des ressources énergétiques (donc ici celui du photovoltaïque au sol) d'un territoire grâce au cadastre énergétique. Le cadastre énergétique permet donc de d'identifier les zones qui sont en théorie adaptées aux énergies renouvelables.

Avec l'introduction des ZAER, la mise en place effective de ces dernières a imposé une nouvelle logique d'aménagement : prioriser les espaces déjà artificialisés, tels que les parkings, les toits de bâtiments, les friches industrielles ou les infrastructures dégradées. Cette approche vise à répondre aux exigences de la loi ZAN tout en limitant l'impact environnemental des projets.

Le cadre réglementaire des ZAER impose aux collectivités de coordonner leurs démarches avec les documents d'urbanisme supérieurs, tels que :

Le SRADDET qui fixe les orientations régionales pour les ENR. Le SCoT (pour garantir la cohérence entre les projets locaux et régionaux, et le PCAET qui définit des objectifs locaux pour la transition énergétique.

Cette articulation entre les différentes échelles territoriales soulève des enjeux majeurs de gouvernance et de coordination. En effet, l'identification et la délimitation des ZAER nécessitent une approche multi-scalaire complexe, les objectifs nationaux de production d'énergie renouvelable doivent être déclinés au niveau régional via le SRADDET, puis territorialisés dans les SCoT et les PLU, tout en respectant les ambitions locales définies dans les PCAET. Cette cascade d'échelles peut créer des tensions entre les différents échelons décisionnels, notamment quand les objectifs de production d'énergie entrent en conflit avec les enjeux de préservation des terres agricoles portés par les collectivités locales. La répartition des

compétences entre intercommunalités et communes dans la définition des ZAER peut également générer des blocages, particulièrement dans les territoires où la pression foncière est forte. La gouvernance de ces projets nécessite donc une coordination fine entre les acteurs et une vision partagée du développement territorial, d'autant plus que les choix d'implantation des panneaux photovoltaïques peuvent avoir des impacts durables sur l'aménagement du territoire et les dynamiques.

Hors ZAER, cette articulation devient encore plus complexe car elle ne bénéficie pas du même cadre facilitateur, multipliant les risques de blocages administratifs et d'interprétations divergentes entre échelons. À l'échelle régionale, le SRADDET doit arbitrer entre des objectifs parfois contradictoires : développement des EnR, protection des terres agricoles et limitation de l'artificialisation. Au niveau des SCoT, la difficulté réside dans la traduction spatiale de ces arbitrages, notamment pour identifier les secteurs privilégiés d'implantation. Les PLU, eux, doivent conjuguer ces orientations avec les réalités foncières locales, en définissant précisément les zonages adaptés, qu'il s'agisse ou non de ZAER.

La gouvernance de ces projets nécessite donc une coordination fine entre les acteurs et une vision partagée du développement territorial, d'autant plus que les choix d'implantation des panneaux photovoltaïques impactent durablement l'aménagement du territoire. Cette complexité est renforcée pour les projets hors ZAER, qui doivent naviguer dans un cadre réglementaire moins structuré selon le ministère de la transition écologique, avec des procédures d'autorisation souvent plus longues et une sécurisation juridique plus incertaine, tout en devant également répondre aux exigences croissantes de limitation de l'artificialisation des sols.

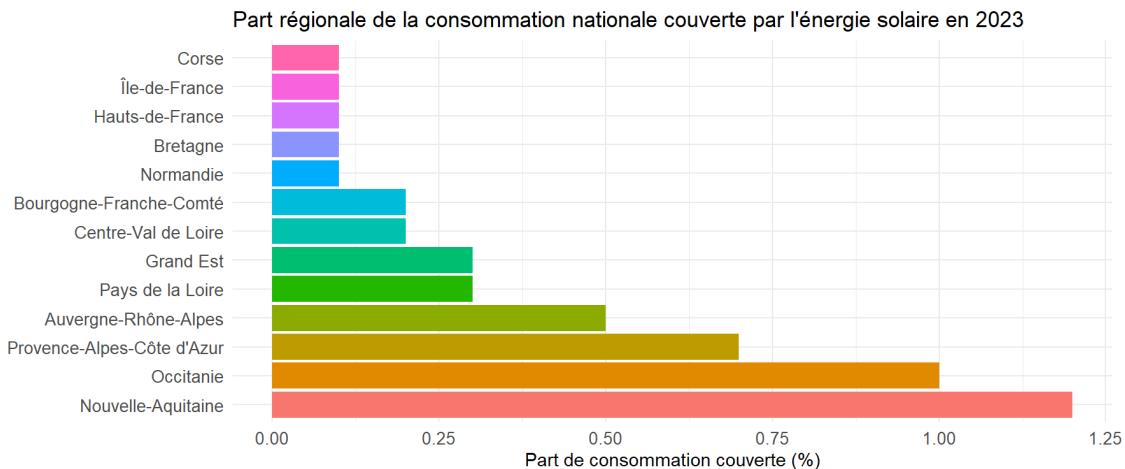
Les ZAER introduisent également un volet incitatif pour les collectivités et les porteurs de projets, notamment en simplifiant les démarches administratives (comme la réduction des délais d'enquête publique) et en proposant des mécanismes de financement via des fonds dédiés, dont 85 % sont réinjectés dans des projets locaux.

Cette réforme contribue à valoriser le foncier existant et à structurer les logiques d'implantation spatiale des infrastructures photovoltaïques. Les porteurs de projets bénéficient d'un cadre sécurisé, et les collectivités, d'un levier économique pour développer des projets durables, du moins en théorie.

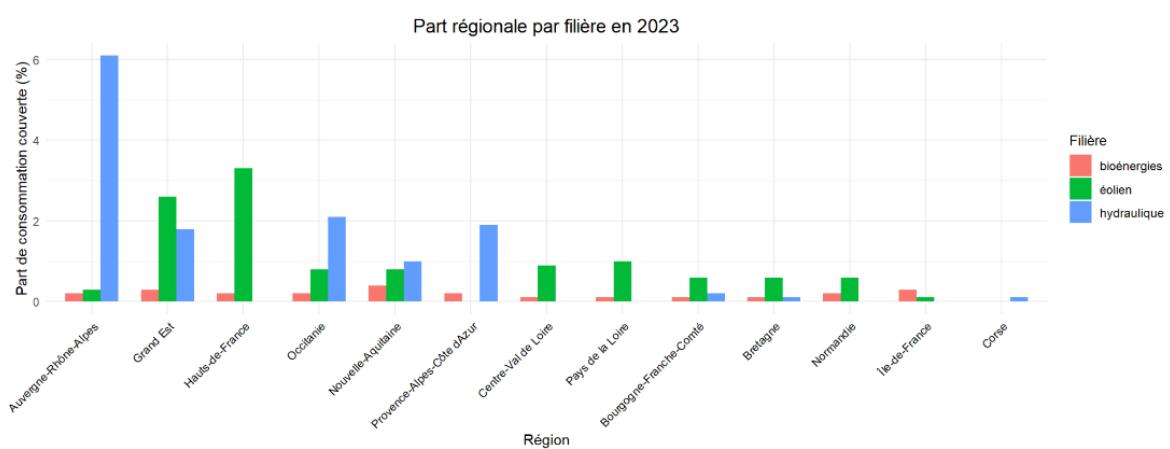
La région PACA est fortement concernée par les enjeux de territorialisation de l'énergie en raison de son fort potentiel énergétique, avec un excellent gisement solaire, combiné à une pression foncière importante pour l'usage agricole des terres, ainsi qu'à de nombreux espaces naturels protégés. Cet enjeu désigne donc l'intégration des dynamiques énergétiques dans les spécificités géographiques, économiques et sociales d'un territoire, cet enjeu permet d'analyser les tensions multi-échelles entre les objectifs nationaux (neutralité carbone, sobriété foncière) et les besoins locaux (préservation des paysages, développement économique). Ces tensions sont susceptibles de se refléter, particulièrement dans les dispositifs d'aménagement comme les ZAER et les PCAET, qui visent à concilier ambitions nationales et contraintes territoriales.

## 1.7 Les enjeux de la transition énergétique en région PACA : un focus sur le photovoltaïque

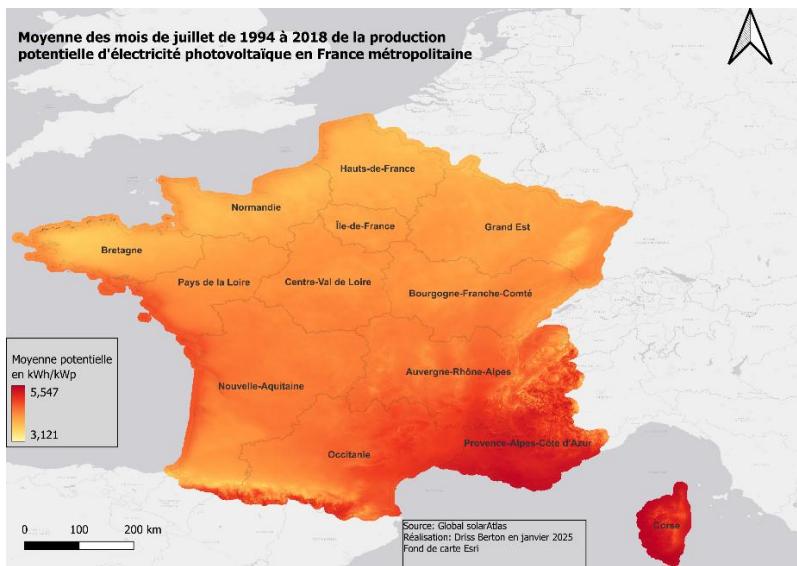
La situation actuelle de la transition énergétique en région PACA révèle certaines contradictions entre potentiel solaire exceptionnel, contraintes foncières et paysagères marquées. Cette analyse permet d'éclairer les enjeux spécifiques liés à l'implantation du photovoltaïque au sol dans la région.



Graphique 1 : Part régionale de la consommation nationale couverte par l'énergie solaire en France en 2023.  
Source : Données produites par RTE, avec contributions de l'INSEE, IGN et NaturalEarth



Graphique 2 : Part régionale des énergies renouvelables en France en 2023. Source : Données produites par RTE, avec contributions de l'INSEE, IGN et NaturalEarth



Carte 1 : Potentiel solaire en France métropolitaine

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) se positionne comme un territoire important dans la transition énergétique française, portée par son exceptionnel potentiel solaire mais aussi confrontée à des tensions territoriales marquées (pression foncière agricole, problématique paysagère et espaces naturels). Ce contexte en fait un véritable laboratoire pour analyser les dynamiques et contradictions de cette transition, particulièrement en ce qui concerne l'implantation de centrales photovoltaïques au sol. Sous l'impulsion de lois telles que la Loi de Transition Énergétique pour une Croissance Verte (2015) et la Loi Climat et Résilience (2021), PACA est engagée dans des objectifs ambitieux de développement des énergies renouvelables (ENR), avec le photovoltaïque comme levier principal. Selon les scénarios "Transitions 2050" de l'ADEME, répondre aux objectifs nationaux nécessitera une emprise au sol comprise entre 75 000 et 125 000 hectares, dont une part importante sera située en PACA. Cependant, cet enjeu se confronte à des contraintes spécifiques, notamment une pression foncière élevée en raison notamment du conflit d'usage due à la compétition avec les usages agricoles par exemple ou à cause des paysages naturels ou culturels protégés.

Cependant la région PACA est plutôt en retard concernant sa production d'énergie renouvelable comparé aux autres régions. La région PACA ne compte aucune part d'énergie éolienne (0 %) dans sa consommation électrique régionale. Cette situation s'explique par l'impact visuel significatif des éoliennes sur le paysage, particulièrement protégé et valorisé dans cette région, ainsi que par leur forte consommation de surfaces foncières. Ces facteurs contribuent à placer la région PACA en retard sur le développement de l'éolien. Par ailleurs, malgré un gisement solaire parmi les plus importants en France, PACA n'est que la troisième région en termes de part de consommation électrique couverte par l'énergie solaire, derrière l'Occitanie et la Nouvelle-Aquitaine. Cela illustre les défis spécifiques liés à la territorialisation de l'énergie dans cette région, où les contraintes paysagères, foncières et sociales freinent le développement des infrastructures de production d'énergies renouvelables. (*cf. graphique 1 et 2*)

Pourtant La région PACA, bénéficiant d'un des plus forts gisements solaires de France (*cf. carte 1*), voit ce potentiel exacerber des conflits d'usage dans une région où les terres naturelles, agricoles et forestières sont fortement convoitées. Comme le souligne Chabrol (2022), la dépendance historique à des infrastructures énergétiques centralisées (concept de dépendance au chemin) ralentit la transition vers des systèmes plus décentralisés et accentue ainsi les tensions liées à l'aménagement du territoire. Le croisement des enjeux de protection paysagère, de préservation du patrimoine culturel et de maintien de l'activité agricole, peut en partie expliquer le retard de la région PACA en matière de développement des énergies renouvelables et ce, malgré un potentiel solaire parmi les plus élevés de France. La région n'arrive en effet qu'en troisième position au niveau national pour la part de consommation couverte par l'énergie solaire (*cf. graphiques 1 et 2*), et affiche également un certain retard concernant les autres filières renouvelables.

On peut facilement dire que ces politiques liées à la transition énergétique ont permis aux collectivités territoriales d'intensifier leur rôle, grâce notamment aux lois de transition énergétique qui leur confèrent davantage de compétences. Les collectivités, en tant que relais locaux, jouent un rôle stratégique en traduisant les politiques nationales en actions adaptées à leur territoire. Leur implication ne se limite pas à une application passive des directives mais elles agissent comme des moteurs d'innovation, valorisant les ressources locales et mobilisant des acteurs variés, tels que des entreprises ou des associations environnementales.

La transition énergétique ne correspond pas seulement à une décentralisation administrative, elle implique également une véritable relocalisation de la production et des choix énergétiques, rapprochant ainsi les lieux de production des espaces de consommation et renforçant l'autonomie des territoires. Les concepts d'autonomie et d'autosuffisance énergétique trouvent une résonance particulière dans des projets tels que les écoquartiers ou les fermes solaires intégrées dans les réseaux locaux. En PACA, cette relocalisation se traduit par des projets qui associent acteurs publics, entreprises locales et citoyens.

Les collectivités territoriales, en valorisant des solutions adaptées aux spécificités locales, démontrent leur capacité à réinventer les systèmes énergétiques. On peut parler ici de transition « par le bas », qui est un processus de transformation initié par des acteurs locaux, de petite échelle ou communautaires, plutôt que par des décisions imposées par des institutions centrales ou des politiques nationales. Cela permettrait à chaque territoire d'adapter sa transition énergétique en fonction des besoins et des spécificités de chaque région. Par exemple, en PACA, en ce qui concerne les tensions foncières liées à un conflit d'usage du foncier entre agriculture et photovoltaïque, cela permettrait de concilier les deux avec la mise en place de l'agrivoltaïsme. Cela pourrait également résoudre le problème de l'acceptabilité locale en mettant en place des projets citoyens ou participatifs, par exemple. Ainsi, une transition « par le bas » en PACA permettrait d'adresser les contraintes foncières et paysagères tout en valorisant les ressources locales et en renforçant l'autonomie énergétique des territoires.

## **Données et méthode**

Etudier les permis de construire, disponibles sur le site de la DREAL, constitue l'un des moyens les plus efficaces pour analyser les dynamiques et logiques spatiales d'implantation des panneaux photovoltaïques. En effet, lorsqu'une parcelle foncière répond à toutes les exigences imposées par les réglementations et les normes environnementales mentionnées précédemment, le porteur de projet, qu'il soit privé ou public, peut déposer une demande de permis de construire. Une fois ce permis accordé, il est ensuite recensé et consultable via la DREAL. Cela permet aux chercheurs et aux autorités de suivre l'évolution des projets, tout en permettant d'analyser les sites privilégiés pour l'implantation des panneaux photovoltaïques en fonction des critères environnementaux et réglementaires locaux. Même si, ici, les permis disponibles sur le site de la DREAL ne sont pas exhaustifs, car certains projets (permis déposés) de faible production ne sont pas recensés par la DREAL, il s'agit donc de projets très mineurs que l'on peut écarter de notre analyse.

Ensuite, en complément, l'utilisation du cadastre énergétique du service de la transition énergétique de la région PACA permettra d'évaluer le potentiel photovoltaïque des friches constructibles dans la région. Il s'agit des friches libres, là où il n'y a ni permis déposé, ni site

Ainsi, nous pourrons, dans un premier temps, identifier les types fonciers compatibles d'accueillir des centrales photovoltaïques au sol en région PACA (de manière théorique, c'est-à-dire les terrains aptes à recevoir ce type d'infrastructure et actuellement disponibles) et analyser leurs caractéristiques réglementaires et foncières. Nous comparerons ensuite ces terrains avec ceux où des permis de construire ont été déposés (la réalité). En examinant les éventuelles différences spatiales (par exemple, des zones avec un fort potentiel photovoltaïque mais peu de permis accordés par la DREAL), nous pourrons identifier les types fonciers compatibles qui, bien que théoriquement adaptés, restent inexploités. Cette analyse permettra de mettre en évidence certains critères ou problématiques spécifiques à ces terrains qui limitent l'obtention de permis.

Ensuite, à l'inverse, en étudiant les permis déposés, analyser leur concentration spatiale permettra d'identifier les zones optimales et réellement adaptées à l'accueil de centrales photovoltaïques en PACA. Étudier ces zones permettra donc de déterminer les critères et les caractéristiques réglementaires ou foncières des zones idéales pour accueillir des installations photovoltaïques au sol en région PACA.

Ainsi l'analyse des permis de construire disponibles sur le site de la DREAL, combinée à l'utilisation du cadastre énergétique régional, peut mettre en lumière des différences entre les potentialités théoriques et les réalisations concrètes. Ces outils permettent de localiser les parcelles compatibles libres, identifiées comme aptes à accueillir des infrastructures photovoltaïques, et de comparer ces données avec les zones effectivement exploitées. Comme le montre la thèse de Maximin Chabrol, cette disparité résulte souvent de critères économiques et sociaux non pris en compte dans les évaluations purement techniques. Par exemple, les régions à fort potentiel solaire ne sont pas toujours les plus exploitées en raison de la proximité au réseau électrique ou de l'opposition des parties prenantes locales.

## **2. Élaboration d'une analyse multicritère pour l'identification des zones favorables à l'implantation photovoltaïque en PACA**

### **2.1 L'élaboration d'une méthode de caractérisation du potentiel d'installation du photovoltaïque au sol**

Dans le cadre du mémoire, l'un des objectifs est de mettre en évidence les logiques spatiales d'implantation des centrales photovoltaïques au sol en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), ainsi que les facteurs qui les conditionnent. Pour cela, une étape importante consiste à identifier les zones théoriquement favorables à l'implantation, c'est-à-dire les zones présentant un potentiel élevé d'accueil de projets photovoltaïques car les données du cadastre énergétique ne sont pas exploitables. Enfin, l'analyse sera menée à l'échelle des parcelles cadastrales, afin de travailler sur une unité foncière concrète, directement mobilisable pour des projets réels.

Cela suppose la construction d'une méthode d'évaluation multicritère, basée sur un ensemble d'indicateurs croisant des dimensions techniques, environnementales, relatives à la disponibilité du sol et réglementaires. L'objectif est donc de construire une carte de potentiel régional, permettant d'identifier les espaces (et parcelles) théoriquement adaptées à l'accueil de projets, avant de comparer ce potentiel avec la localisation réelle des permis de construire délivrés. Cette comparaison vise à détecter d'éventuelles discordances spatiales entre le potentiel théorique et les choix d'implantation réels, afin d'interroger les logiques d'aménagement à l'œuvre.

La méthode repose sur une approche de scoring spatial, dans laquelle chaque critère est reclasé selon un système de notation allant de 0 (exclusion) à 3 (très favorable). Cette grille permet une lecture synthétique du niveau de compatibilité d'un espace avec l'installation de centrales photovoltaïques au sol. Les critères sont ensuite combinés pour générer une carte de synthèse du potentiel photovoltaïque.

Pour réaliser cette carte multicritère, voici la catégorisation des scores en 4 notes de chaque critère :

**0 : Exclusion** → Ces zones ne peuvent pas accueillir de photovoltaïque au sol et seront considérées comme des « NoData » dans l'analyse. Elles seront donc exclues du raster de notation. Ainsi, sur les cartes de potentiel, les zones « vides » correspondent en réalité aux zones notées 0.

**1 : Zones peu favorables** → Ces zones peuvent accueillir du photovoltaïque au sol, mais ne sont pas optimales.

**2 : Zones favorables** → Ces zones sont adaptées pour recevoir du photovoltaïque au sol.

**3 : Zones très favorables** → Ces zones sont optimales pour l'installation de photovoltaïque au sol.

L'échelle d'analyse choisie repose sur l'utilisation du format raster. En effet, tous les critères ont été calculés dans un SIG. Le potentiel photovoltaïque ainsi que la pente étaient déjà disponibles en format raster. En ce qui concerne l'accessibilité ou les distances aux infrastructures, les données initialement en format vecteur ont été converties en raster à l'aide

de l'outil « Distance euclidienne », qui a permis de calculer la distance en mètres par rapport aux infrastructures régionales. Le choix d'une résolution spatiale de 50 mètres carré a été choisi. Tous les raster utilisées reposent à la fois sur des considérations techniques et méthodologiques. En effet, la résolution conditionne directement la précision des analyses spatiales, notamment celles portant sur le relief (calculs de pente, de distance etc). Tout d'abord, le format carré des pixels (25 m en X et 25 m en Y) permet d'éviter les distorsions liées aux différences de distances entre les centres de pixels dans les directions cardinales et diagonales. En effet, les algorithmes de calcul de pente s'appuient sur les variations d'altitude entre un pixel et ses voisins, rapportées à leur distance horizontale. Dans un raster aux dimensions non carrées, une même variation d'altitude ne produira pas la même valeur de pente selon qu'elle se situe dans la direction Est-Ouest ou Nord-Sud, introduisant ainsi un biais systémique dans l'analyse. L'utilisation de pixels carrés garantit donc une homogénéité directionnelle, assurant une mesure plus fiable et cohérente du relief (*Rudant & Frison, 2019*). Par ailleurs, une résolution de 25 mètres représente un compromis pertinent entre niveau de détail et capacité de traitement. Elle permet de capter les grandes tendances topographiques à l'échelle régionale ou intercommunale, tout en maintenant des temps de calcul raisonnables, notamment dans le cadre de traitements multi-critères sur de vastes emprises. Cette granularité est donc adaptée à une démarche d'analyse territoriale, comme celle menée ici, visant à caractériser de manière robuste les logiques d'implantation spatiale ou les potentiels environnementaux à l'échelle régionale.

Pour avoir le nombre de réglementations environnementales une grille a été appliquée. Une jointure spatiale a ensuite été réalisée avec l'ensemble des couches de réglementation (initialement en format vecteur). Le nombre de réglementations présentes sur chaque carreau a été comptabilisé, fournissant ainsi une valeur intitulée « nombre de réglementations ». Ainsi pour les aspects réglementaires et d'occupation du sol qui sont à l'origine des données en vecteur, elles ont été converties en format raster avec une résolution spatiale de 25\*25 mètres. Pour chaque pixel de 25 mètres de côté, une valeur correspondant au type d'occupation du sol ou au nombre de réglementations a été attribuée selon la méthode du "maximum de surface". Cette approche consiste à examiner, pour chaque pixel, tous les polygones d'occupation du sol qui l'intersectent et à lui attribuer la valeur de la classe d'occupation du sol qui couvre la plus grande proportion de sa superficie.

Cette méthode permet de préserver au mieux l'information spatiale contenue dans les données vectorielles originales, tout en créant une structure matricielle régulière adaptée aux analyses quantitatives et aux modélisations spatiales (*Joost, Lassueur & Caloz, 2004*). Ces couches ont ensuite été converties en raster avec une note via l'outil « reclassification », comme l'ensemble des autres couches. Cette méthode a permis d'attribuer une note à chaque critère. Ensuite tous ces rasters ont été combinés pour réaliser la carte de potentiel avec l'outil « superposition pondéré ». Enfin, plusieurs pondérations des critères seront testées selon différents scénarios, afin d'observer les variations induites sur la répartition du nombre de pixels par note.

Ces valeurs (notes) sont ensuite jointes aux parcelles cadastrales (PCI – Parcellaire Express, IGN) sous forme d'un attribut, permettant d'évaluer spatialement l'opportunité d'implantation de panneaux solaires à l'échelle de la parcelle. Les carreaux de 25\*25m étant plus petits qu'une parcelle, il pouvait parfois y avoir plusieurs carreaux de notes différentes dans une même

parcelle. Ainsi le traitement principal ici a été une analyse par zones (zonal statistics), consistant à résumer les valeurs raster situées à l'intérieur de chaque polygone de parcelle. Avec comme statistique calculée la valeur majoritaire parmi les pixels intersectant chaque parcelle. Cela permet de retenir la valeur (note) dominante du potentiel sur chaque parcelle. L'avantage de cette méthode est que cela permet une bonne robustesse face aux petits effets de bords mais l'inconvénient potentiel est que cela peut lisser la variable interne aux grandes parcelles.

La même méthode a été appliquée pour les rasters de critère avec des données qualitatives ou catégorielles comme nombre de réglementations et le type d'occupation du sol. Pour ce qui est des rasters de critères avec une nature quantitative continue, tels que la pente, la distance aux infrastructures ou le potentiel solaire, la statistique utilisée est la moyenne, jugée plus représentative de la valeur globale du critère sur l'ensemble de la parcelle. Ce choix méthodologique vise à adapter la statistique zonale à la nature de chaque donnée, assurant ainsi la cohérence et la pertinence des valeurs attribuées aux entités vectorielles (parcelles).

Enfin, afin de mettre en relation les projets photovoltaïques autorisés (permis délivré par la DREAL) avec les parcelles cadastrales, une jointure spatiale a été réalisée entre la couche des permis et la couche des parcelles. La méthode repose sur une intersection spatiale, permettant d'identifier les parcelles qui se superposent partiellement ou totalement à un permis. Toutefois, pour éviter les erreurs liées à des décalages géométriques ou à des contacts marginaux, seules les intersections représentant au moins 10 % de la surface totale de la parcelle ont été retenues. Cette condition permet de s'assurer que les parcelles retenues sont réellement concernées par un projet, et non simplement effleurées par un débordement du périmètre du permis. La présence d'un permis sur une parcelle est ensuite notée « 1 » et l'absence « 0 ».

## 2.2 La combinaison des données et des indicateurs pour la carte multicritère

Les données utilisées proviennent de sources variées, sélectionnées pour représenter au mieux les contraintes et opportunités liées à l'implantation de centrales photovoltaïques au sol. Le zonage réglementaire issu des PLU disponibles sur le Géoportail de l'Urbanisme n'a pas été intégré en raison de l'hétérogénéité des documents d'urbanisme à l'échelle régionale, du manque d'harmonisation des données SIG, ainsi que de l'absence de données pour certaines communes. Mobiliser ces informations à l'échelle régionale aurait nécessité des traitements longs et complexes. Il s'agit ici d'une limite de mon travail, qui reste une analyse à l'échelle régionale. En revanche, dans le cadre d'une analyse plus fine, ciblée sur un territoire restreint ou quelques communes, l'intégration du zonage réglementaire aurait été particulièrement pertinente pour affiner l'évaluation des contraintes légales.

Il y'a également le cadastre énergétique qui est une donnée géographique recensant les différentes installations de production d'énergie renouvelable à l'échelle locale, notamment les centrales photovoltaïques, éoliennes, ou hydroélectriques, avec leurs caractéristiques techniques et spatiales. Dans le cadre de l'analyse, cette donnée aurait constitué une ressource précieuse pour mieux comprendre la répartition actuelle du photovoltaïque au sol en région PACA. Cependant, elle n'a pas pu être mobilisée ici, car elle n'est accessible au public que via un portail cartographique interactif sur internet, sans possibilité de téléchargement sous un format SIG exploitable directement (tel que shapefile ou geopackage) pour des analyses

spatiales approfondies. Ainsi ne pouvant exploiter les données du cadastre énergétique en format SIG, j'ai opté pour la construction d'indicateurs géographiques exploitables, à partir des éléments suivants :

<b>Critère</b>	<b>Source et description</b>
<b>Potentiel solaire</b>	Donnée issue de Global Solar Atlas (Solargis), exprimée en kWh/m <sup>2</sup> /an, modélisée selon l'irradiation, la température de l'air et l'inclinaison optimale.
<b>Pente</b>	Calculée à partir du MNT (Modèle Numérique de Terrain) régional, afin d'identifier les zones aux pentes faibles, propices à l'installation.
<b>Occupation du sol</b>	Donnée issue de DataSud, combinant le MOS (Modèle d'Occupation du Sol) et la BD Ortho, utilisée pour identifier les surfaces artificialisées, agricoles, naturelles ou en friche.
<b>Réseaux électriques</b>	Distances aux postes de transformation HTA et aux lignes électriques aériennes (données RTE), utilisées pour évaluer la faisabilité du raccordement.
<b>Accessibilité</b>	Distance aux routes principales, permettant d'évaluer la facilité logistique d'accès au site (sources RTE et IGN BD TOPO).
<b>Contraintes réglementaires</b>	Compilation des réglementations environnementales susceptibles de limiter ou restreindre l'installation de PV (ZNIEFF 1, Natura 2000, réserve nationale et régionale, sites classés et inscrits, zones à risques naturels Arrêtés préfectoraux – DREAL PACA,).

Tableau 1 : Données utilisées pour l'analyse multicritère

Encore une fois, l'attribution des notes selon chaque critère est issue d'entretiens avec certains chefs de projet du secteur mais demeurent malgré tout subjective. Ainsi, ces notes peuvent contenir un certain biais d'appréciation, mais elles restent basées sur des réalités du terrain, des références et certaines hypothèses personnelles.

Pour ce qui est de la donnée concernant les permis, ce sont les permis de construire instruits par l'État, c'est-à-dire les projets au sol d'une puissance généralement supérieure à 3 MWc (mégawatt-crête, unité qui désignant la puissance maximale qu'une installation photovoltaïque peut atteindre dans des conditions optimales d'ensoleillement). Cette restriction limite la représentativité globale, notamment en ce qui concerne les dynamiques locales portées par les collectivités ou les projets de moindre envergure.

## **La Pente :**

La pente influence directement la faisabilité technique et économique du photovoltaïque au sol. À partir de 20 degrés, les travaux deviennent lourds et coûteux, ce qui justifie l'exclusion (note 0) de ces zones. Ce seuil est couramment repris dans la littérature, notamment par l'ADEME (2021) et les cahiers des charges de certains appels d'offres (CRE), qui recommandent de privilégier les terrains à faible déclivité. Les pentes comprises entre 15 et 20° sont notées 1 car elles nécessitent des aménagements particuliers. Les pentes entre 5 et 15° restent exploitables sans trop de surcoût, d'où la note 2. Enfin, les terrains entre 0 et 5° sont considérés comme très favorables (note 3), car ils permettent une installation facile et optimisent la stabilité des structures.

## **Le Potentiel photovoltaïque**

Le barème utilisé repose sur les données du *Global Solar Atlas* (Solargis, 2020), qui fournit une estimation de la production annuelle potentielle d'électricité photovoltaïque (*PVOUT*) en kWh/m<sup>2</sup>/an. Cette production est modélisée à partir de plusieurs paramètres climatiques, notamment l'irradiation solaire globale à l'inclinaison optimale (*GTI – Global Tilted Irradiance*) et la température de l'air, calculés sur la base de moyennes mensuelles de longue durée (1994–2018). Les valeurs sont produites à une résolution de 30 arc-secondes, soit environ 1 km<sup>2</sup>, selon les algorithmes propriétaires de Solargis. Afin de construire une grille de notation simplifiée, quatre classes ont été distinguées :

Une production inférieure à 900 kWh/m<sup>2</sup>/an est considérée comme insuffisante pour garantir la rentabilité d'une centrale, ce qui justifie la note 0.

Entre 900 et 1100 kWh/m<sup>2</sup>/an, la productivité reste marginale, justifiant une note de 1. Un seuil minimal de 1000 kWh/m<sup>2</sup>/an est toutefois souvent considéré comme un plancher acceptable pour les projets raccordés au réseau.

Entre 1100 et 1300 kWh/m<sup>2</sup>/an, la production devient économiquement viable (note 2).

Au-delà de 1300 kWh/m<sup>2</sup>/an, la rentabilité est optimale (note 3), d'autant plus que la majorité des projets en exploitation dans le sud de la France dépassent les 1500 kWh/m<sup>2</sup>/an (CRE, 2022 ; Enedis, 2021 ; PVGIS).

## **Distance aux postes de transformation électrique**

Le raccordement à un poste de transformation est une contrainte économique majeure. Selon les retours d'expérience de développeurs de projets, notamment dans les études d'impact ou les rapports Enedis, un poste situé à plus de 10 km entraîne des coûts bien trop importants, justifiant l'exclusion (note 0). Entre 5 et 10 km, le raccordement reste possible mais avec un coût élevé (note 1). Une distance comprise entre 1 et 5 km est couramment utilisée dans les projets de taille moyenne (note 2). Enfin, une proximité directe, inférieure à 1 km, est considérée comme idéale (note 3), car elle limite fortement les pertes et les coûts liés aux travaux de raccordement.

## **Distance aux lignes HTA aériennes**

Le raisonnement est similaire à celui des postes de transformation, mais à une autre échelle. Les lignes HTA (Haute Tension A, généralement comprises entre 1 000 et 50 000 volts) permettent un raccordement plus souple que les postes, mais nécessitent tout de même une proximité suffisante pour rester économiquement viable. Une distance supérieure à 5 000 m est considérée comme rédhibitoire (note 0). Entre 2 000 et 5 000 m, le raccordement est envisageable avec des travaux conséquents (note 1). Entre 500 et 2 000 m, les coûts restent acceptables (note 2), tandis qu'à moins de 500 m, les conditions sont idéales (note 3). Ces seuils sont issus de divers rapports de faisabilité (ex. Enerplan, 2020) et d'hypothèses réalisistes fondées sur les retours de terrain de maîtres d'ouvrage.

## **Occupation du sol**

L'analyse des types d'occupation des sols repose sur une reclassification des types de sols fonction de leur compatibilité physique, juridique et foncière avec l'installation de centrales PV au sol. Sont exclues (note 0) : les zones urbanisées, les zones humides, les forêts denses, et les surfaces en eau, conformément aux orientations du SRADDET PACA, aux chartes de Parcs Naturels Régionaux et aux études DREAL. Ce choix d'exclure les zones urbanisées se justifie par le fait que l'analyse porte prioritairement sur le potentiel d'accueil de projets de grande envergure, nécessitant des emprises foncières importantes, difficiles à mobiliser en milieu urbain dense.(car ici les « zones urbanisées » correspondent surtout à du bâti résidentiel )En effet, les zones urbanisées présentent des contraintes majeures : forte artificialisation, fragmentation du foncier, présence de réseaux ou d'infrastructures, conflits d'usages, et forte pression foncière. Ces conditions limitent fortement la faisabilité technique et économique de projets photovoltaïques au sol. Cette approche est d'autant plus pertinente que l'analyse sera comparée aux données de la DREAL PACA, qui recensent exclusivement les projets ayant fait l'objet d'un permis de construire, c'est-à-dire des projets d'une certaine ampleur. Ainsi cela permet une meilleure cohérence entre l'analyse de potentiel théorique et les implantations effectives observées dans le territoire.

Les zones notées 1 sont les surfaces forestières claires, les terres arables ou les cultures permanente. Les zones notées 2 correspondent aux prairies, friches ouvertes, et certaines cultures. Enfin, la note 3 est réservée aux surfaces agricoles peu contraintes, aux sols nus, et aux anciennes carrières ou friches anthroposées jugées compatibles avec un changement d'usage ou bien d'anciennes mines ou décharges.

## **Distance aux routes**

Ce critère répond à des enjeux logistiques : plus un site est accessible, plus les coûts de chantier et de maintenance sont faibles. Les zones à plus de 5 000 m d'une route sont notées 0 car elles nécessitent des aménagements spécifiques, parfois inacceptables en zone naturelle. Entre 2 000 et 5 000 m, l'accessibilité reste difficile (note 1). Entre 500 et 2 000 m, les routes sont accessibles sans lourds travaux (note 2). Et à moins de 500 m, les conditions sont idéales (note 3). Ce barème est basé sur des hypothèses pratiques d'accès logistique, renforcées par l'analyse

d'implantations existantes en région PACA, où la proximité à une route est un facteur clé d'instruction des permis.

### **Contraintes réglementaires (nombre de zonages environnementaux présents)**

Le barème repose ici sur une approche cumulative : plus une zone est couverte de protections réglementaires (Natura 2000, ZNIEFF, ZICO, PNR, zones inondables...), plus les démarches d'autorisation sont longues, incertaines, voire impossibles. Une zone avec 5 ou 6 réglementations superposées est notée 0 (exclusion), car elle est quasi-inconstructible. Entre 3 et 4, le potentiel existe mais les contraintes sont fortes (note 1). Entre 1 et 2 zonages, une étude au cas par cas est possible (note 2). Enfin, une absence totale de contrainte réglementaire donne lieu à la note 3. Cependant, cette méthode présente une limite importante : elle ne prend pas en compte la nature des protections, uniquement leur nombre. Or, une seule réglementation peut suffire à rendre une zone inconstructible ou à exclure totalement l'installation de projets photovoltaïques (par exemple, un site classé ou une zone rouge du Plan de Prévention des Risques Naturels). À l'inverse, certaines protections peuvent être compatibles avec des projets sous conditions. Ainsi, cette approche cumulative, bien que pragmatique à l'échelle régionale, peut sur- ou sous-estimer localement les contraintes effectives. Elle constitue donc un outil d'orientation générale, mais ne se substitue pas à une analyse réglementaire fine à l'échelle des parcelles. Une pondération aurait éventuellement pu pallier en partie les limites de cette méthode mais pas entièrement.

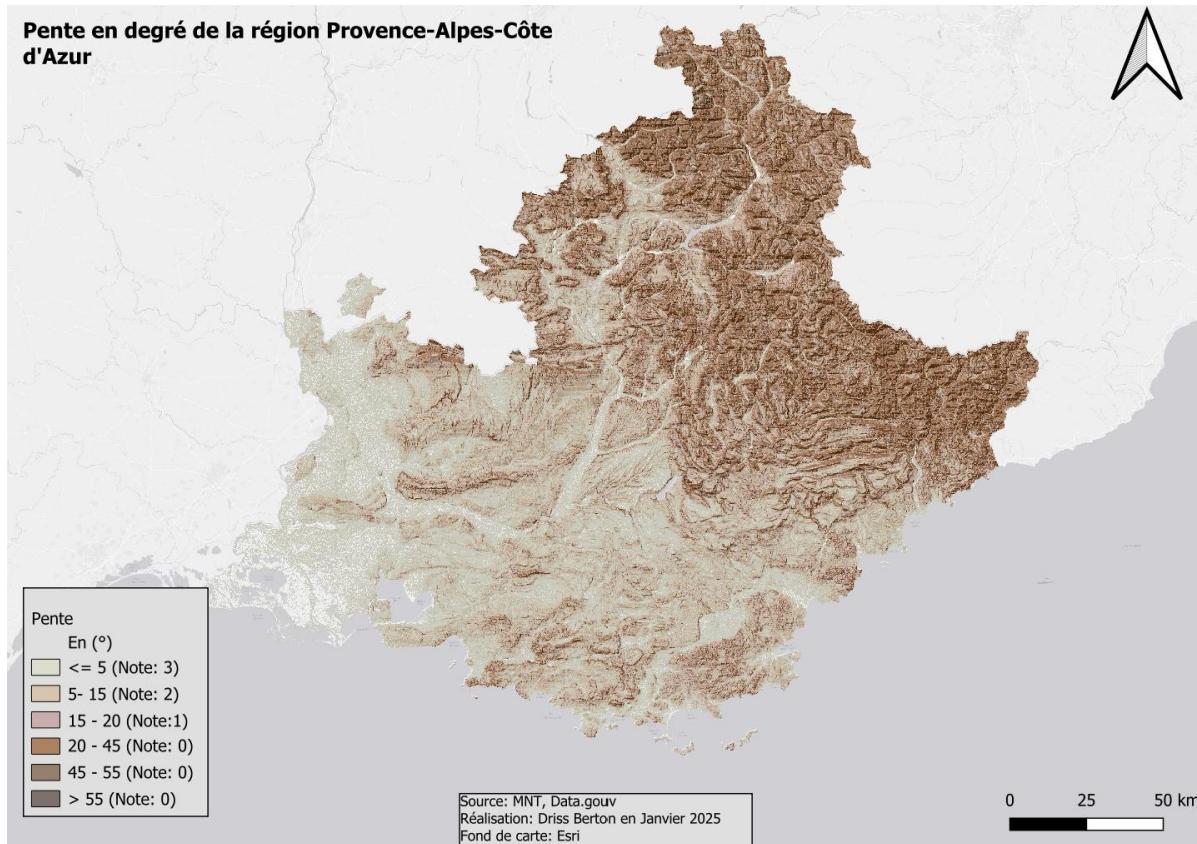
### **Tableau récapitulatif des critères et de leur notation utilisée dans la carte multicritère pour l'implantation de photovoltaïque au sol en PACA :**

Critère	Note :0 (Exclusion)	Note :1(Peu favorable)	Note :2 (Favorable)	Note :3(Très favorable)
Pente (en °)	> 20°	15° – 20°	5° – 15°	0° – 5°
Potentiel solaire (kWh/m <sup>2</sup> /an)	< 900 kWh	Entre 900 et 1 100 kWh	Entre 1 100 et 1 300 kWh	> 1 300 kWh
Distance aux postes électriques (m)	> 10 000	5 000 – 10 000	1 000 – 5 000	< 1 000
Distance aux lignes aériennes (m)	> 5 000	2 000 – 5 000	500 – 2 000	< 500
Occupation du sol (par regroupement)	Zones artificialisées, forêts denses, zones humides	Zones boisées peu accessibles	prairies, friches	sols nus, zones agricoles ouvertes, carrières, anciennes mines
Distance aux routes (m)	> 5 000	2 000 – 5 000	500 – 2 000	< 500
Réglementation	≥ 5	3 – 4	1 – 2	0

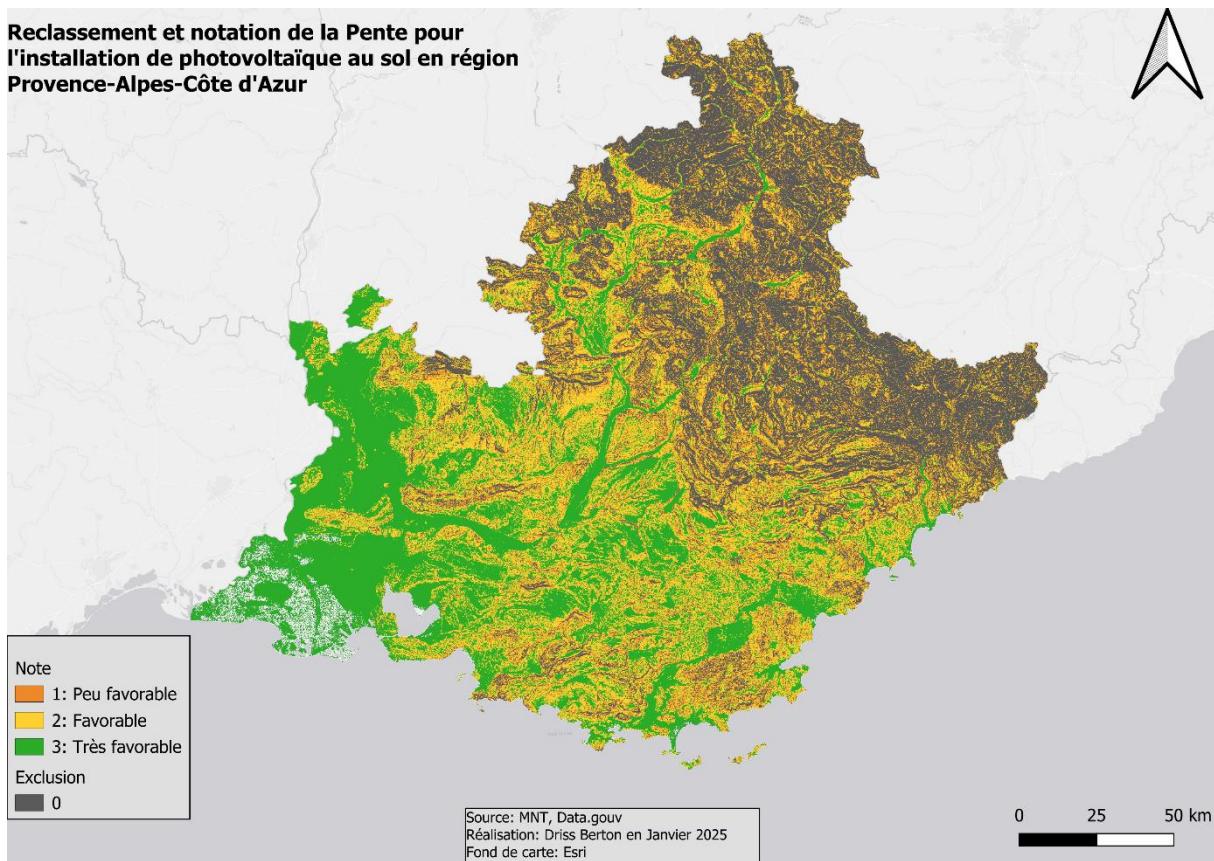
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des notes

## **2.3 Les géographies différencierées des critères d'évaluation du potentiel d'implantation du photovoltaïque au sol**

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est marquée par une forte hétérogénéité topographique, avec des contrastes nets entre les reliefs alpins du nord et de l'est, et les plaines du sud et de l'ouest.



Carte 2 : Pente en degré de la région PACA



Carte 3 : Reclassement de la Pente

Cette diversité se retrouve dans la répartition des notes attribuées selon le critère de pente pour l'installation de panneaux photovoltaïques au sol (*cf. carte 2*).

Les zones notées 0, correspondant aux pentes supérieures à 20°, se concentrent très majoritairement dans les départements alpins : les Alpes-Maritimes, les Hautes-Alpes et l'est des Alpes-de-Haute-Provence. Il s'agit de secteurs de montagne (Mercantour, Préalpes, Ubaye) caractérisés par une forte déclivité, où toute installation au sol serait techniquement très complexe, voire inenvisageable. Ces zones constituent donc les principales exclusions dans le cadre d'un aménagement solaire au sol (*cf. carte 2*). On peut toutefois observer, même dans ces contextes montagneux, quelques poches non exclues dans certaines vallées internes ou fonds de bassin, traduisant une relative variabilité topographique locale.

Les zones notées 3, représentant les pentes inférieures ou égales à 5°, sont les plus favorables à l'installation. Elles se concentrent largement dans les plaines du sud et de l'ouest de la région, notamment dans les Bouches-du-Rhône (Camargue, Crau, plaine de l'Étang de Berre), dans la basse vallée du Rhône, autour d'Avignon, et dans une partie du Var et du Vaucluse (*cf. carte 2*). Ces terrains plats et étendus présentent des conditions idéales en matière de topographie pour accueillir des centrales photovoltaïques au sol, sans nécessiter de travaux d'adaptation majeurs.

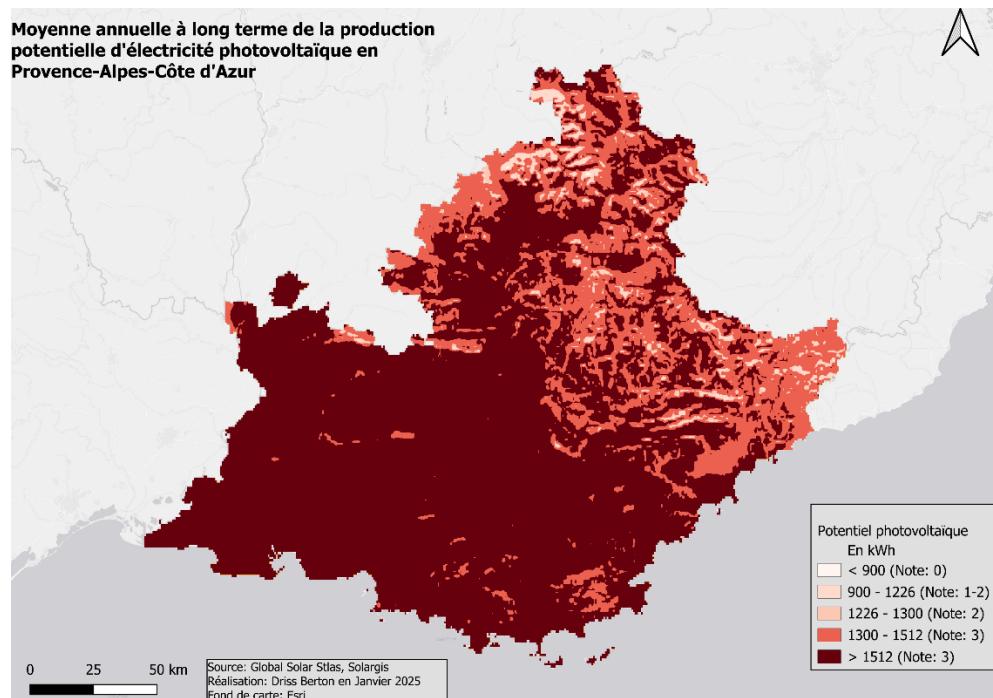
Les zones notées 2, correspondant à des pentes comprises entre 5° et 15°, sont classées comme favorables. Elles forment une ceinture intermédiaire autour des grandes zones planes, en s'insérant dans les piémonts, les collines douces et les rebords de plateaux. Leur répartition suit une logique topographique cohérente, visible notamment dans l'arrière-pays d'Aix-en-

Provence, autour du Luberon, dans le centre du Var ou en Dracénie (*cf. carte 2*). Ces terrains restent techniquement aménageables, même s'ils peuvent nécessiter quelques adaptations selon la configuration locale.

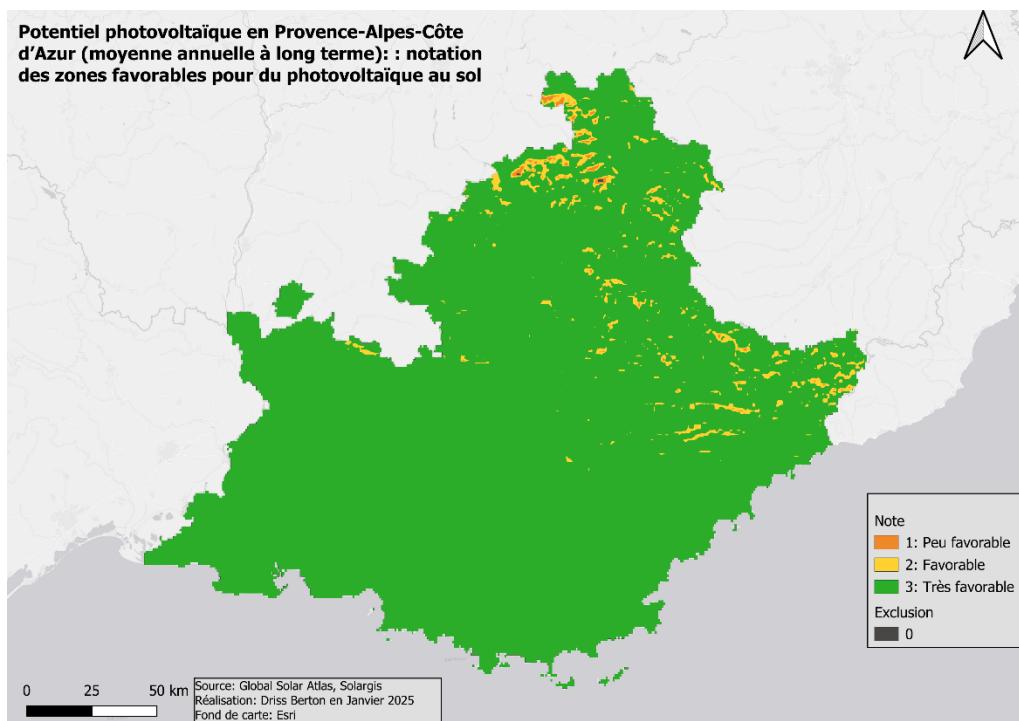
Enfin, les zones notées 1, correspondant à des pentes comprises entre 15° et 20°, sont jugées peu favorables. Leur répartition est plus fragmentée que celle des autres classes, et elles apparaissent de manière plus dispersée sur l'ensemble du territoire. On les retrouve par petites touches dans les vallons encaissés, les replis de terrain ou les zones de rupture de pente, en particulier dans des territoires de transition entre plaine et montagne (*cf. carte 2*). Cette dispersion s'explique par la nature même de cette amplitude, qui marque un seuil critique entre des terrains encore exploitables et ceux qui deviennent trop contraignants. Elle reflète aussi la complexité géomorphologique de la région, où les ruptures topographiques sont fréquentes et localisées.

En se basant uniquement sur le critère de la pente pour l'installation photovoltaïque au sol, les zones notées 3, très favorables, se concentrent dans les plaines et les bassins du sud, (*cf. carte 3*) où la topographie offre les meilleures conditions d'accueil. Les zones notées 2 représentent des secteurs techniquement accessibles, souvent situés en périphérie des plaines, dans des contextes de pente modérée. Les zones notées 1 apparaissent comme des marges irrégulières, souvent discontinues, dont l'exploitation dépendra de facteurs locaux plus précis. Enfin, les zones notées 0, fortement pentues, sont clairement défavorables et peuvent être exclues du potentiel photovoltaïque au sol, notamment du fait que les coûts de travaux sont 2 à 5 fois plus élevés qu'en terrain plat (études ADEME 2023).

La notation du potentiel solaire est basée sur les seuils techniques de l'ADEME (2023) et de PVGIS. Ces seuils (< 900, 900–1 100, 1 100–1 300, > 1 300 kWh/m<sup>2</sup>/an) reflètent à la fois les critères de rentabilité du secteur et les spécificités climatiques locales.



Carte 4 : Potentiel solaire en région PACA

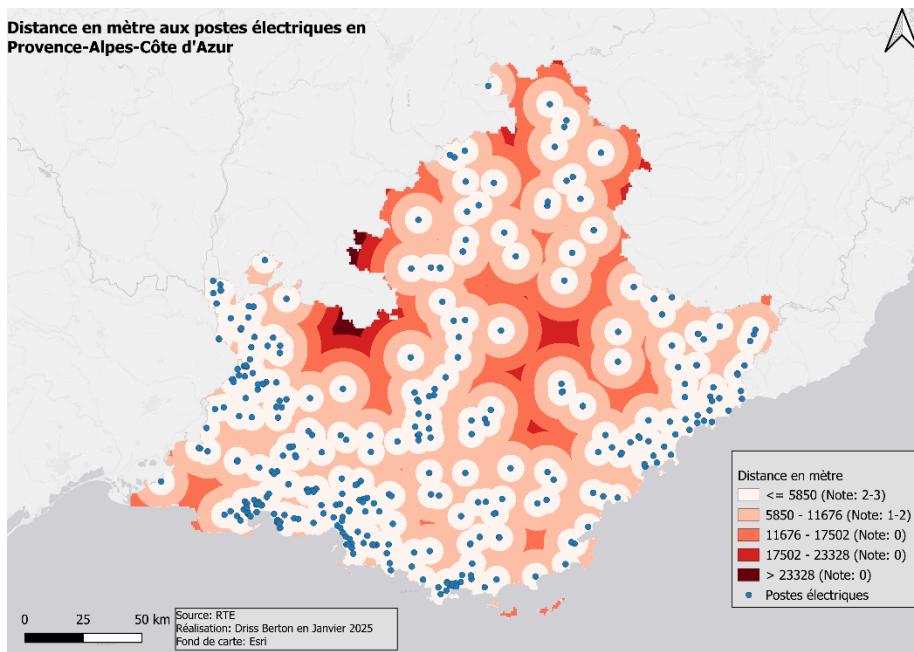


Carte 5 : reclassement du potentiel solaire

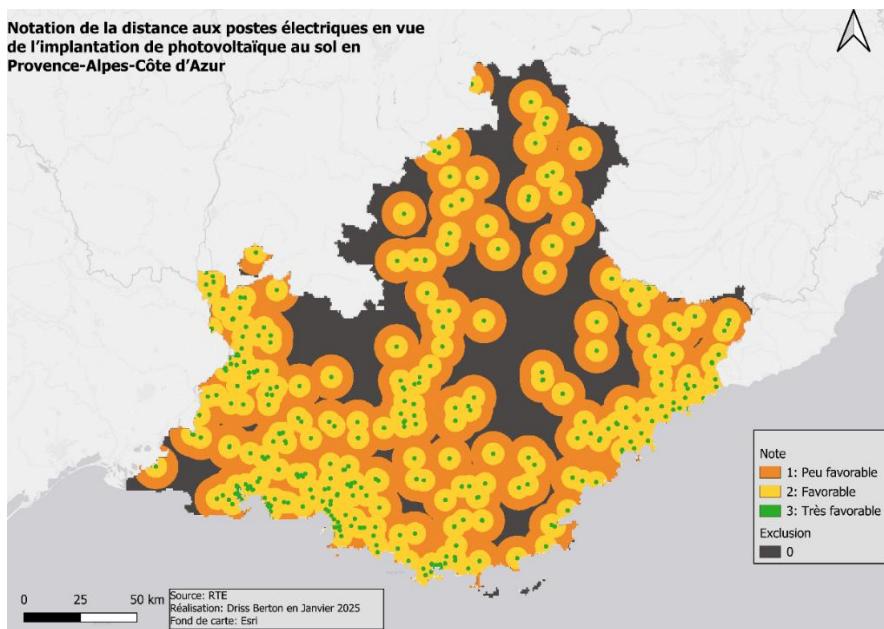
Pour ce qui est du potentiel solaire, comme mentionné dans l'introduction, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est celle qui possède le potentiel le plus élevé, très loin devant toutes les autres régions. Concernant les tendances régionales de ce critère, les zones côtières et du sud de la région (Bouches-du-Rhône, Var, Alpes-Maritimes) présentent les valeurs les plus élevées en potentiel solaire ( $> 1\ 500 \text{ kWh}$ ). À mesure que l'on remonte vers le nord et l'intérieur des terres (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes), le potentiel diminue progressivement, notamment en raison de l'altitude et du relief qui augmentent dans ces zones. On constate ainsi que les zones avec une pente importante sont également celles où le potentiel solaire est le plus faible dans la région (*cf. carte 4*)

Cependant, malgré ces variations, le potentiel (*cf. carte 5*) solaire reste très élevé dans quasiment toute la région, ce qui explique pourquoi presque toute la région est classée en zone « Très favorable ». Ainsi, même si certaines disparités existent en termes de potentiel pur, la région dans son ensemble est très favorable à l'installation de photovoltaïques au sol.

La représentation cartographique des distances aux infrastructures électriques (postes de transformation et lignes HTA) a pour objectif de mettre en évidence la variation spatiale des contraintes de raccordement à l'échelle régionale. Dans cette optique, la méthode de discréétisation par intervalles égaux a été retenue pour la classification des distances exprimées en mètres.



Carte 6 : Distance en mètre aux postes électriques en PACA



Carte 7 : Reclassage de la distance aux postes électriques

Ce choix méthodologique repose d'abord sur la nature métrique et linéaire de la variable. La distance est une donnée quantitative continue exprimée dans une unité régulière (ici en mètres), pour laquelle une progression arithmétique est parfaitement adaptée. La méthode des intervalles égaux permet ainsi de découper l'espace de manière homogène, chaque classe représentant une plage de distance de même amplitude, ce qui favorise la lisibilité et la comparabilité entre les différentes zones.

Ce mode de discréétisation présente également l'avantage de maintenir une cohérence entre les différentes cartes produites pour les postes et les lignes. Même si les seuils de notation diffèrent

entre ces deux types d'infrastructures, l'usage d'intervalles réguliers permet d'unifier la lecture graphique et de faciliter les comparaisons visuelles.

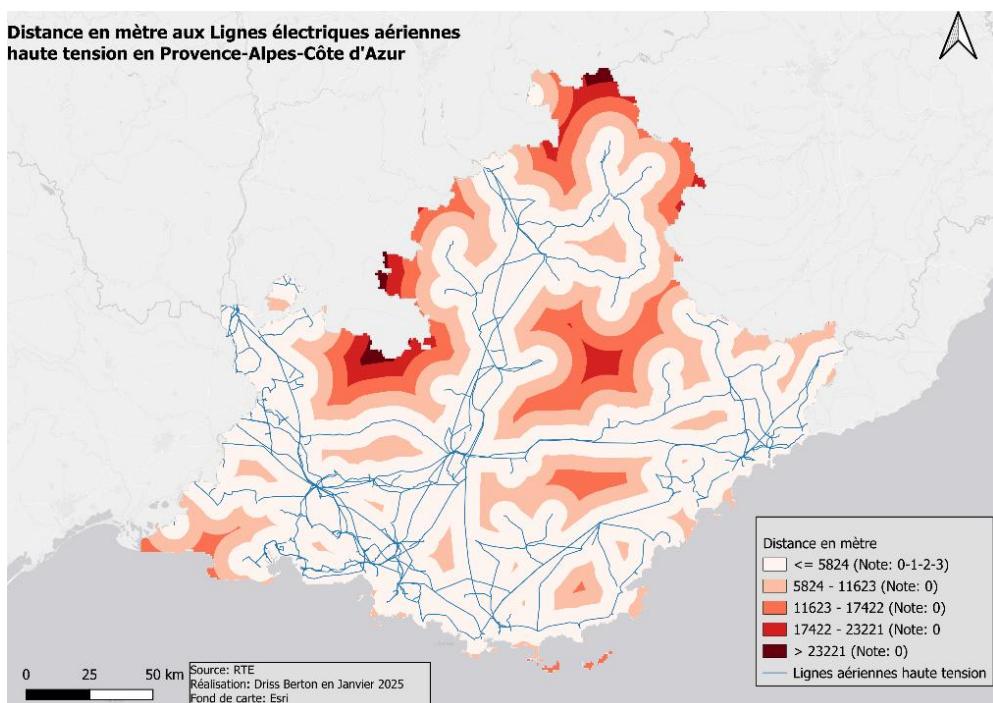
Enfin, le fait d'appliquer une même méthode de discréétisation pour l'ensemble des cartes de distances aux infrastructures garantit une cohérence cartographique d'ensemble, tant sur le plan visuel que méthodologique. Cela permet de comparer les gradients de distance d'une infrastructure à l'autre, sans introduire de biais liés à des méthodes de classification hétérogènes.

La répartition spatiale de la distance aux postes électriques en région PACA met en évidence des contrastes nets entre des territoires bien desservis en postes électriques et d'autres plus isolés (*cf. carte 6*). Les zones les plus proches des postes électriques, correspondant aux distances inférieures ou égales à 5 000 mètres, se concentrent dans le sud et l'ouest de la région, notamment dans les Bouches-du-Rhône, le Vaucluse, le sud du Var ainsi qu'autour des grandes agglomérations comme Marseille, Aix-en-Provence, Avignon ou encore Toulon. Ces secteurs, généralement urbanisés ou périurbains, disposent d'un maillage électrique dense, hérité d'une longue histoire industrielle, logistique ou résidentielle. Ces zones proches des infrastructures sont classées très favorables ou favorables dans la carte de notation (*cf. carte 7*).

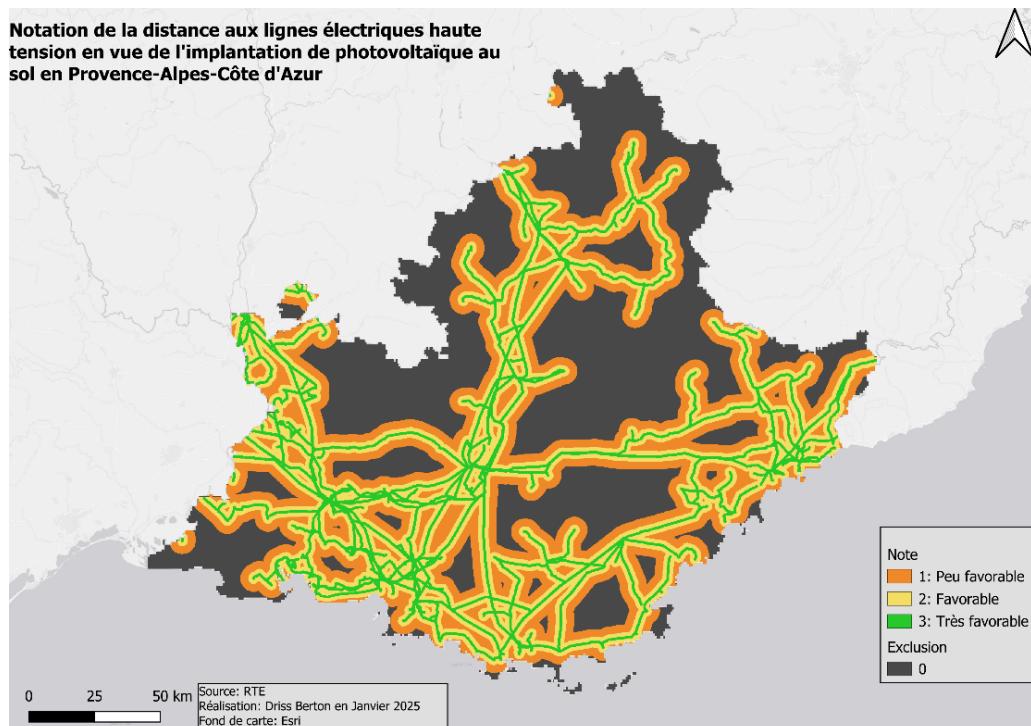
À l'inverse, les distances les plus importantes, supérieures à 17 000 mètres, se retrouvent principalement dans le nord et le centre des Alpes-de-Haute-Provence, dans les secteurs de moyenne montagne du Var (notamment au nord de Brignoles ou dans les collines du Haut-Var), ainsi que dans les marges orientales des Alpes-Maritimes (*cf. carte 6*). Il s'agit de territoires moins densément peuplés, où le réseau électrique est plus diffus, souvent limité à des infrastructures locales. Ces zones sont notées 0 dans la grille de notation (*cf. carte 7*), traduisant une accessibilité au réseau très contrainte pour des projets photovoltaïques au sol.

Les zones notées 2 (favorables) apparaissent en ceinture des grands pôles urbains et agricoles, dans des contextes de transition entre territoires bien desservis et secteurs plus isolés (*cf. carte 7*). Quant aux zones notées 1 (peu favorables), elles se distribuent de manière plus éclatée sur le territoire ; leur fragmentation spatiale reflète leur position intermédiaire et la variabilité du maillage électrique selon la topographie et l'occupation du sol (*cf. carte 7*).

On observe une certaine relation entre la proximité aux postes électriques et d'autres critères comme la pente ou le potentiel photovoltaïque. En effet, les zones les plus proches des postes électriques correspondent souvent à des terrains plats et ouverts, déjà identifiés comme très favorables selon le critère topographique (pente inférieure à 5°). Il s'agit en particulier des plaines du sud-ouest de la région, de la basse vallée du Rhône à la Crau en passant par le pourtour de l'étang de Berre. À l'inverse, les secteurs éloignés du réseau coïncident en grande partie avec les zones pentues ou enclavées, notamment dans les reliefs alpins et les plateaux isolés du centre Var.



Carte 8 : Distance en mètre aux lignes électriques en PACA



Carte 9 : Reclassement de la distance aux lignes électriques

On observe que les valeurs de distance aux postes électriques sont globalement similaires à celles calculées pour les lignes électriques aériennes (*cf. carte 8*). Cette convergence est particulièrement visible grâce à l'utilisation de la même méthode de discréétisation par intervalles égaux, qui permet une lecture cohérente entre les figures (*cf. carte 6 et 8*)

Cette similarité s'explique par la structure du réseau électrique lui-même : en effet, les postes de transformation et les lignes aériennes sont interdépendants, et souvent implantés dans les mêmes secteurs. Ainsi, pour un grand nombre de localisations sur le territoire, la distance à une ligne est très proche de celle à un poste, car les deux infrastructures se trouvent à proximité immédiate l'une de l'autre. Cette configuration se traduit par des plages de distance équivalentes, notamment dans les zones notées comme favorables ou très favorables au raccordement (*cf. carte 9*).

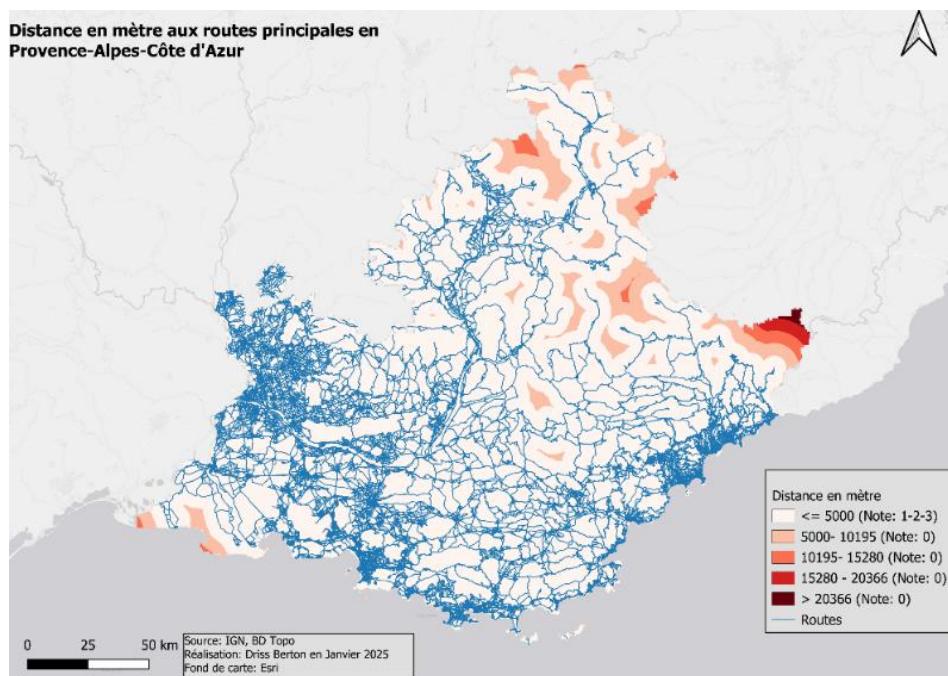
La répartition des distances aux lignes électriques aériennes haute tension en région Provence-Alpes-Côte d'Azur révèle une structuration territoriale très marquée (*cf. carte 8*). Ces lignes, représentées en bleu dans la carte du critère brut figure (), dessinent un maillage relativement dense sur la moitié sud de la région, tandis que la partie nord-est apparaît nettement moins couverte. La carte en dégradé de rouge, indiquant la distance en mètres, met en évidence que la proximité aux lignes (zones claires) concerne essentiellement : le littoral méditerranéen, notamment entre Marseille, Toulon et Nice, ainsi qu'une grande partie du centre Var, bien que plus morcelée.

En revanche, les zones très éloignées des lignes ( $> 17\,000$  m, représentées en rouge foncé à Bordeaux) se situent dans le nord des Alpes-Maritimes, dans les Alpes-de-Haute-Provence et dans certains secteurs du nord Vaucluse, où les infrastructures HT sont plus rares, souvent en raison de la configuration topographique contraignante et de la faible densité d'équipement (*cf. carte 8*).

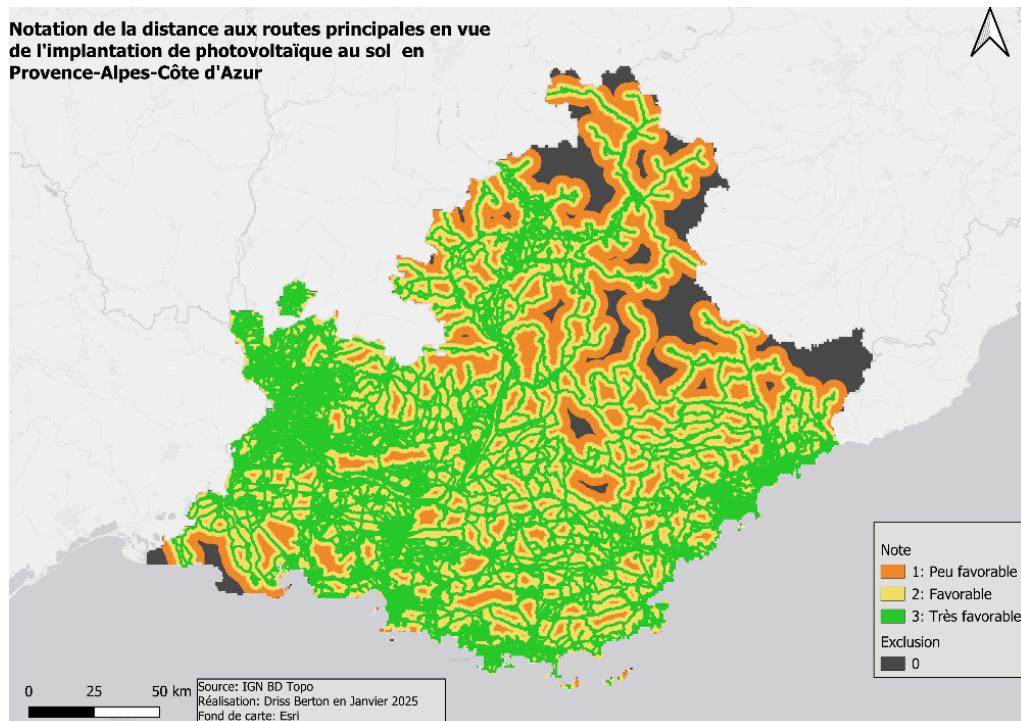
La carte de notation permet de lire plus clairement les implications de cette configuration pour le photovoltaïque au sol (*cf. carte 9*). Les zones notées 3 (très favorables), correspondant à une proximité directe ( $< 500$  m), sont concentrées autour des principaux axes HT de distribution, notamment dans le Var, dans les Bouches-du-Rhône et dans certaines portions du Vaucluse. Les zones notées 2 (favorables), entre 500 et 2 000 mètres des lignes, prolongent cet axe, formant des ceintures autour des couloirs électriques principaux. Les zones notées 1 (peu favorables) apparaissent plus diffusément dans les marges de ces réseaux, en particulier dans le centre Var, les Baronnies provençales, ou les bords du Luberon.

Enfin, les zones notées 0 (exclus) occupent une part importante du territoire régional, en particulier dans les reliefs alpins du nord et de l'est. Ces zones cumulent souvent d'autres handicaps déjà identifiés dans l'analyse des critères précédents : pente trop élevée et éloignement aux postes de transformation (*cf. carte 9*). Ce sont des territoires peu accessibles, faiblement équipés, et donc difficilement viables pour des projets solaires au sol du point de vue du raccordement.

La carte des distances aux routes met en évidence une trame d'accessibilité très dense et bien maillée, particulièrement marquée dans le sud de la région.



Carte 10 : Distance aux routes en PACA



Carte 11 : Reclassement de la distance aux routes

Le réseau routier principal, représenté en bleu, couvre l'essentiel du territoire régional, à l'exception de quelques secteurs de montagne, notamment dans le nord des Alpes-Maritimes, dans certaines portions des Hautes-Alpes ou encore à l'est du Verdon.

Cette forte accessibilité régionale se reflète clairement dans la carte de notation (*cf. carte II*). Les zones notées 3 (très favorables) dominent très largement l'espace représenté. Elles s'étendent de façon continue sur l'ensemble des zones de plaine, de piémont et des grandes vallées, en particulier la vallée du Rhône et le Comtat Venaissin, les bassins d'Avignon, Aix-en-Provence, Toulon et Marseille, la basse vallée de la Durance, la Crau, le littoral varois et les abords du golfe de Saint-Tropez.

Les zones notées 2 (favorables) forment des ceintures autour des axes principaux et restent relativement bien réparties, y compris dans certains secteurs ruraux. Les zones notées 1 (peu favorables) sont rares et se situent plutôt en périphérie des grands axes ou dans des interstices peu desservis. Enfin, les zones notées 0 (exclues) sont extrêmement marginales, localisées uniquement dans certains fonds de vallées ou zones de montagne isolées (notamment dans le Mercantour et le Haut-Verdon). Leur faible présence témoigne de la bonne couverture régionale en termes de réseau routier.

Ce critère présente une distribution bien plus favorable que les autres critères d'infrastructures (postes ou lignes HT), avec une proximité routière étendue à la majorité du territoire (*cf. carte II*). Cela s'explique par la densité du réseau routier qui, contrairement aux infrastructures électriques, couvre également les zones périurbaines et rurales. On note une forte corrélation spatiale avec les zones planes à faible pente (notées 3 pour la pente), notamment dans les Bouches-du-Rhône, le Vaucluse et le Var. Ces secteurs apparaissent donc comme des espaces à fort potentiel logistique, cumulant bon ensoleillement, facilité de raccordement, et accessibilité. Une zone bien équipée en réseau électrique et en postes de transformation l'est généralement aussi en infrastructures routières.

### **Structuration régionale des infrastructures et enjeux pour l'implantation de photovoltaïque au sol**

L'analyse croisée des distances aux postes électriques, aux lignes électriques aériennes haute tension et aux routes principales permet de dresser un état des lieux de la structuration des infrastructures en région PACA, et d'en tirer des enseignements pour le développement de projets photovoltaïques au sol. Ces trois réseaux, bien que répondant à des logiques techniques et fonctionnelles distinctes, dessinent ensemble une trame d'aménagement et de desserte qui influence fortement la faisabilité des implantations à l'échelle régionale.

La première lecture à retenir est que ces infrastructures ne sont pas réparties aléatoirement, mais suivent des logiques de réseau étroitement imbriquées :

Les postes électriques présentent une répartition ponctuelle relativement homogène, mais leur densité reste modérée, notamment dans les espaces de moyenne montagne. Ils sont implantés prioritairement à proximité des zones urbaines, industrielles ou agricoles majeures, dans les plaines et les vallées.

Les lignes électriques aériennes assurent la continuité du réseau entre postes, mais leur déploiement suit des axes précis et linéaires, laissant de larges portions du territoire à distance importante. Elles couvrent davantage le centre et le sud de la région, suivant des couloirs de distribution bien définis.

À l'inverse, le réseau routier principal est nettement plus dense et maillé, irriguant largement les zones de plaine et les vallées habitées, y compris certaines parties rurales intermédiaires. Il représente l'infrastructure la plus généralisée à l'échelle régionale.

Ce décalage de densité et de géométrie entre réseaux se retrouve visuellement sur les cartes de distances : alors que la majorité du territoire est à moins de 5 km d'une route principale, ce seuil n'est atteint que pour des portions bien plus restreintes concernant les lignes ou les postes.

La lecture des cartes de notation permet d'objectiver l'influence de chaque réseau sur la faisabilité du photovoltaïque au sol. On remarque alors que le réseau routier est le moins contraignant, avec plus de 90 % du territoire noté favorable ou très favorable, du fait de la forte densité du maillage routier. Les lignes électriques aériennes constituent un réseau structurant mais sélectif, avec des zones favorables concentrées le long des grands corridors électriques, notamment dans le Var, les Bouches-du-Rhône et les vallées du sud-est. Enfin, les postes électriques, bien que répartis sur l'ensemble du territoire, génèrent une contrainte forte dès que la distance dépasse 5 à 10 km, excluant de fait une large part des secteurs alpins, de moyenne montagne ou d'arrière-pays enclavé.

Ce différentiel de densité et de rayon d'influence génère un gradient de contrainte : plus une infrastructure est rare et stratégique (comme un poste), plus elle devient déterminante dans la notation. On remarque ainsi une certaine hiérarchie des contraintes selon le type d'infrastructure.

En croisant les trois critères d'infrastructure, on distingue des zones de convergence technique, cumulant la proximité aux trois types d'équipements. Ces zones se localisent principalement :

- Dans les plaines du Vaucluse et de la Durance,
- Autour du bassin d'Aix-en-Provence – Marseille,
- Sur le littoral varois et toulonnais,
- Et dans certaines portions du centre Var.

Ces territoires cumulent des distances faibles, donc des notes élevées, pour les trois réseaux. Ils apparaissent comme des espaces stratégiques privilégiés pour le développement photovoltaïque, car ils maximisent la faisabilité technique (raccordement) et logistique (accessibilité).

Au contraire, on retrouve une très forte récurrence des zones notées 0 dans les reliefs alpins, les fonds de vallée isolés, et les zones de moyenne montagne du nord de la région (Alpes-Maritimes, Hautes-Alpes, Verdon). Ces secteurs cumulent des distances élevées aux postes

(souvent > 15 km), un éloignement marqué aux lignes aériennes, et une accessibilité routière plus limitée, bien que parfois présente.

Ce sont les territoires structurellement les moins favorables pour le développement photovoltaïque au sol, à la fois pour des raisons techniques (coût de raccordement, accessibilité), mais aussi parfois topographiques (pente) ou en termes d'occupation du sol.

Donc, l'analyse des distances aux infrastructures en PACA illustre une géographie très contrastée du potentiel d'équipement, où la densité du réseau routier généralise l'accessibilité, tandis que les contraintes électriques structurent le territoire selon une logique de corridors. Ces observations permettent d'identifier des secteurs clés, où la combinaison des trois critères converge vers une forte faisabilité technique et économique, et d'autres, au contraire, où l'implantation photovoltaïque au sol apparaît difficilement envisageable sans investissements lourds ou solutions alternatives.

Les dispositifs réglementaires ci-dessous ont été retenus dans cette analyse car ils représentent les principales contraintes environnementales et paysagères encadrant l'aménagement du territoire en région PACA. Ils concernent à la fois la biodiversité, les risques naturels, et la préservation du patrimoine naturel ou culturel. Ces périmètres réglementaires sont également ceux pour lesquels des données fiables et homogènes sont disponibles au format SIG, permettant leur intégration dans une analyse spatiale multicritère.

Les dispositifs réglementaires intégrés dans l'analyse sont les suivants :

**Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) de type 1** : il s'agit de secteurs de taille généralement réduite, caractérisés par la présence d'espèces rares, remarquables ou d'habitats naturels sensibles. Ces zones, bien que non juridiquement contraignantes en elles-mêmes, impliquent des précautions dans les projets d'aménagement.

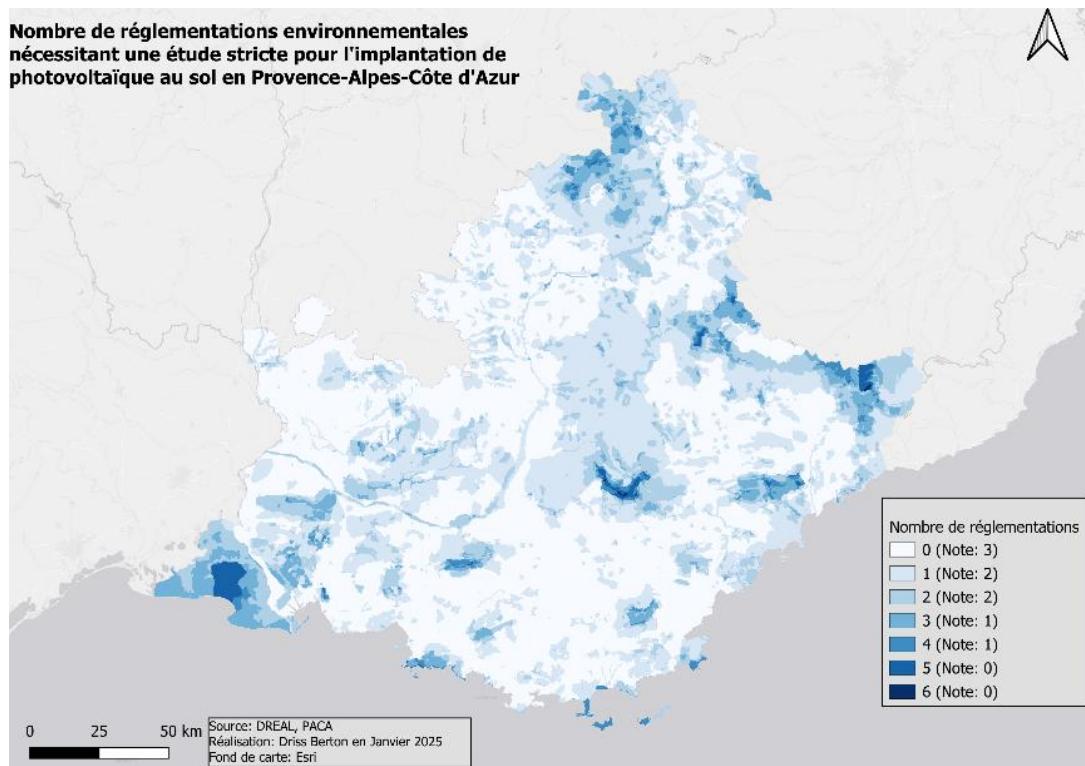
**Sites Natura 2000** : réseau européen de zones de protection écologique, incluant les Zones de Protection Spéciale (ZPS) et les Zones Spéciales de Conservation (ZSC). Ces sites visent la conservation des habitats naturels et des espèces d'intérêt communautaire, et tout projet y étant envisagé est soumis à une évaluation des incidences.

**Réserves naturelles nationales et régionales** : espaces protégés par décret, définis pour préserver des milieux ou des espèces remarquables. Toute activité pouvant porter atteinte aux objectifs de protection y est strictement réglementée, voire interdite.

**Sites classés et inscrits** : désignations patrimoniales au titre du Code de l'environnement pour des motifs paysagers, culturels ou historiques. Les sites classés bénéficient d'une protection forte avec interdiction de modifier leur aspect, tandis que les sites inscrits nécessitent des autorisations spécifiques pour tout aménagement.

**Zones à risques naturels (PPRN)** : secteurs identifiés dans les Plans de Prévention des Risques Naturels, notamment les risques d'inondation, de feu de forêt ou de mouvements de terrain. L'implantation d'infrastructures y est généralement encadrée, restreinte ou interdite selon les niveaux de danger.

**Arrêtés préfectoraux de protection de biotope ou de réglementation spécifique** : ces arrêtés visent à protéger ponctuellement des habitats essentiels à certaines espèces. Ils peuvent interdire toute forme d'aménagement ou d'activité sur des périmètres délimités.

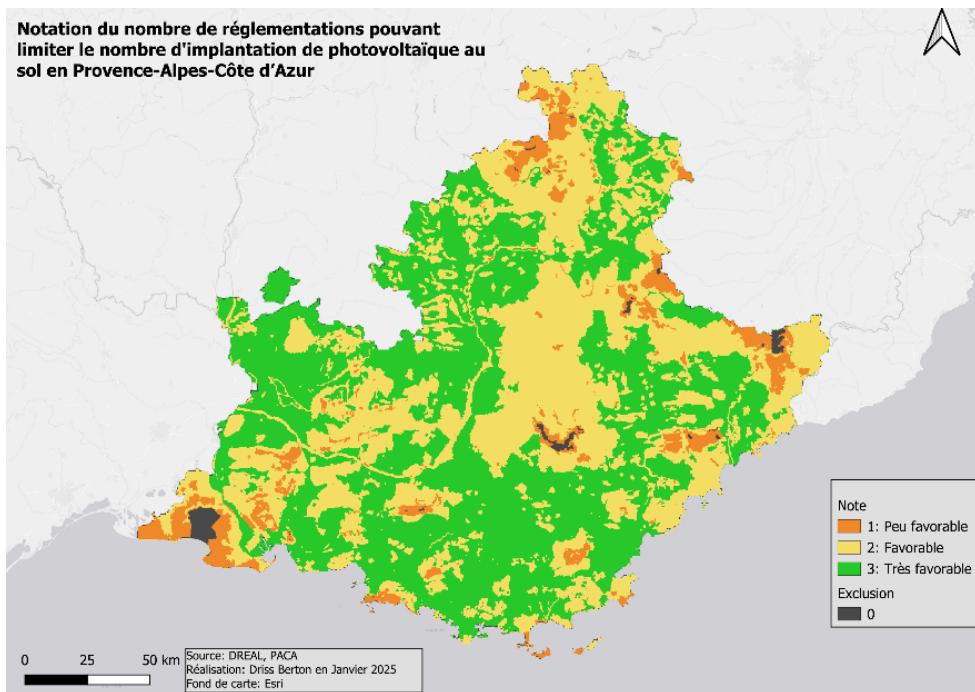


Carte 12 : Nombre de réglementations environnementales en PACA

La *carte 12* met en évidence une organisation spatiale différente du niveau de contrainte réglementaire dans la région PACA. Le dégradé de bleu, allant du blanc (aucune réglementation) au bleu foncé (jusqu'à six contraintes superposées), révèle une structure morcelée et fragmentée, mais loin d'être aléatoire (*cf. carte 12*).

Certaines zones apparaissent clairement comme concentrant une densité plus élevée de réglementations. C'est notamment le cas du nord du département des Alpes-Maritimes, autour du parc national du Mercantour, où les superpositions de périmètres protégés sont nombreuses. On observe également une forte présence réglementaire dans plusieurs massifs forestiers et littoraux : la Côte Bleue, l'étang de Berre, l'Estérel, ainsi qu'une partie de l'ouest varois. Enfin, plusieurs vallées de l'arrière-pays, telles que le Verdon, le Luberon ou la Sainte-Baume, se distinguent par la présence récurrente de protections environnementales.

Ces secteurs cumulent en effet différents statuts de protection parcs nationaux ou régionaux, réserves naturelles, zones Natura 2000, ou périmètres de protection d'espèces qui en font des espaces particulièrement contraints pour tout projet d'aménagement énergétique venant modifier directement le terrain.



Carte 13 : Reclassage du nombre de réglementations environnementales

La *carte 13* vient prolonger cette lecture en traduisant spatialement le niveau de contrainte réglementaire en classes d'aptitude pour l'implantation photovoltaïque (*cf. carte 13*). Les zones notées 0 (exclusion) correspondent aux secteurs les plus contraints, cumulant cinq réglementations ou plus superposées. Dans ces espaces, la compatibilité avec le développement solaire au sol est fortement compromise en raison des enjeux de conservation associés.

Autour de ces noyaux d'exclusion apparaissent les zones notées 1, considérées comme peu favorables. Visuellement représentées en orange, elles dessinent des ceintures périphériques, souvent localisées dans les massifs boisés, les lisières de parcs ou les vallées encaissées, où la pression réglementaire reste importante, mais pourrait faire l'objet d'ajustements selon la nature des projets et les procédures engagées.

À l'opposé, les zones notées 2 et 3, jugées favorables à très favorables, se répartissent principalement dans les espaces agricoles ouverts, les secteurs périurbains, ou les zones où la pression réglementaire est peu dense. C'est notamment le cas dans les Bouches-du-Rhône (plaine de la Crau, Camargue hors zones humides strictement protégées, bassin de l'étang de Berre), au sud du Vaucluse, dans certaines parties du centre Var, ainsi que sur le littoral sud-est, où les dispositifs réglementaires sont plus dispersés ou absents (*cf. carte 13*).

Ce critère possède une spatialité originale comparée aux autres, mais on y retrouve également certaines dynamiques déjà observées dans les autres analyses de critères vues précédemment. Les zones notées 0 ou 1, c'est-à-dire celles soumises à un niveau de contrainte réglementaire élevé, correspondent fréquemment aux secteurs montagneux et forestiers déjà identifiés comme peu favorables en raison de leur forte pente ou de leur éloignement aux infrastructures. On retrouve ainsi un effet de cumul des contraintes dans l'arrière-pays alpin et préalpin, où les obstacles à l'implantation se superposent, qu'ils soient d'ordre physique, technique ou réglementaire.

À l'inverse, les plaines du sud et de l'ouest régional, qui bénéficient d'un relief favorable, d'une bonne accessibilité et d'une proximité aux réseaux, confirment ici encore leur intérêt. Elles présentent un niveau de contrainte réglementaire relativement faible, renforçant leur position comme secteurs prioritaires à considérer dans une logique d'implantation photovoltaïque optimisée.

Au-delà de sa lecture propre, le critère réglementaire joue un rôle déterminant dans une approche multicritère, en apportant une couche de filtrage essentielle face aux autres facteurs techniques ou physiques. Il permet d'identifier les secteurs où, malgré un bon potentiel solaire, une pente adaptée ou une proximité aux infrastructures, la présence de protections environnementales rend l'implantation peu réaliste, voire juridiquement inenvisageable. C'est notamment le cas dans certaines portions du nord-ouest varois, autour du massif de la Sainte-Baume, ou encore dans l'arrière-pays niçois, en lisière du Parc national du Mercantour.

À l'échelle régionale, il contribue ainsi à hiérarchiser l'espace, en soulignant que la faisabilité d'un projet photovoltaïque ne peut se fonder uniquement sur des aspects techniques, mais doit aussi intégrer, dès l'amont, les enjeux de préservation et de compatibilité réglementaire. Ce critère conforte donc la nécessité d'un croisement systématique des contraintes, en vue d'une localisation équilibrée, cohérente et conforme au cadre territorial. C'est pour cela que les études d'impact sont d'une importance capitale pour les porteurs de projets photovoltaïques, et qu'elles sont souvent au centre de la réalisation ou non d'un projet photovoltaïque au sol.

*(Extrait d'entretien réalisé dans le cadre du mémoire, en décembre 2024 avec un responsable d'agence dans une entreprise d'envergure nationale spécialisée dans l'énergie)*

**Driss Berton** : « Dans la structuration d'un projet photovoltaïque au sol, quels sont les critères ou les points les plus contraignants ou ce que vous prenez le plus en compte pour un projet ? »

**Anonyme** : « Clairement les études d'impact sont absolument centrales. Un projet photovoltaïque ne peut aujourd'hui pas avancer sans une évaluation environnementale complète et solide. C'est une étape clé du développement, au même titre que le raccordement ou le foncier. Une mauvaise étude, ou une étude incomplète, peut retarder ou bloquer totalement un projet. Récemment, nous avons vu un projet très ambitieux et rentable totalement annulé car l'étude d'impact avait révélé la présence d'une espèce de fleur très rare et protégée. »

Le critère de l'occupation du sol est basé sur un croisement du MOS (Mode d'Occupation des Sols) et de la BD TOPO, ce croisement a été obtenu via la plateforme Datasud.fr. Pour ce critère, nous avons retenu le niveau 2 de classification (parmi les trois niveaux disponibles : Niv1, Niv2 et Niv3). Ce choix permet d'adopter une approche intermédiaire : suffisamment précise pour différencier les grands types d'occupation du sol (zones urbaines, agricoles, naturelles, etc.), tout en évitant la complexité et les incertitudes que peut engendrer le niveau 3, parfois trop détaillé et hétérogène à l'échelle régionale. Le niveau 2 constitue ainsi un juste milieu entre finesse d'analyse et robustesse des données, permettant une lecture cohérente du

territoire sans tomber dans une granularité excessive difficile à interpréter dans le cadre d'une analyse de potentiel.

La manipulation des données d'occupation du sol a nécessité une étape de conversion du format vectoriel initial vers un format raster, plus adapté aux analyses spatiales multicritères envisagées.

Les données vectorielles d'occupation du sol disponibles en format GeoPackage ont été converties en format raster avec une résolution spatiale de 25 mètres. Cette résolution a été choisie pour maintenir un bon compromis entre la précision spatiale et l'efficacité des traitements ultérieurs.

Pour chaque pixel de 25 mètres de côté, une valeur correspondant au type d'occupation du sol a été attribuée selon la méthode du "maximum de surface". Cette approche consiste à examiner, pour chaque pixel, tous les polygones d'occupation du sol qui l'intersectent et à lui attribuer la valeur de la classe d'occupation du sol qui couvre la plus grande proportion de sa superficie. Cette méthode permet de préserver au mieux l'information spatiale contenue dans les données vectorielles originales, tout en créant une structure matricielle régulière adaptée aux analyses quantitatives et aux modélisations spatiales.

Voici les différents types de sols du MOS utilisé :

### **Zones urbanisées :Note de 0 (Exclusion)**

Les zones urbanisées, comprenant principalement des habitations résidentielles et des infrastructures existantes, sont exclues de tout projet photovoltaïque au sol, principalement en raison des conflits d'usage du sol que cela peut entraîner. En effet, l'artificialisation déjà présente rend l'utilisation de ces surfaces pour l'énergie solaire peu réaliste. En outre, une cohabitation entre zones résidentielles et projets photovoltaïques pourrait poser des problèmes d'acceptabilité sociale, notamment en raison de la perception visuelle, du bruit généré par l'installation ou encore de la densification de l'usage du foncier. Cette exclusion est également justifiée par l'objectif de l'analyse, qui porte sur l'identification des espaces propices à l'accueil de grands projets photovoltaïques au sol, nécessitant des surfaces foncières importantes et continues. Or, en milieu urbain, la fragmentation des parcelles, la pression foncière, ainsi que les contraintes techniques et réglementaires rendent ce type de développement difficilement envisageable. De plus les habitants n'ont généralement pas d'intérêt ni l'envie d'avoir une centrale photovoltaïque à proximité immédiate, ce qui conduit à des résistances locales à de tels projets (cf. Rebotier, Bouisset, Nobert, 2017).

### **Zones industrielles ou commerciales (infrastructures et équipements) : Note de 2 (Favorable)**

Les zones industrielles et commerciales sont plutôt favorables pour l'implantation de photovoltaïques au sol, car ces zones sont déjà dédiées à des activités humaines et à des infrastructures lourdes, sans pour autant être des zones résidentielles, ce qui les rend moins sensibles aux impacts environnementaux ou aux conflits sociaux. L'implantation photovoltaïque peut donc s'intégrer sans créer de nouveaux conflits d'usage. De plus, ces zones sont souvent proches des réseaux électriques à haute tension, ce qui facilite

le raccordement au réseau, réduisant ainsi les coûts logistiques et les délais d'installation. Enfin, le recours à ces zones permet de limiter l'impact sur les espaces naturels tout en contribuant à la transition énergétique, en étant en adéquation avec l'objectif ZAN. En effet, certaines zones industrielles ou commerciales sont déjà artificialisées et peuvent parfois accueillir d'autres types d'artificialisation, voire être reconvertis pour du photovoltaïque au sol, limitant ainsi l'artificialisation de terrains naturels (cf. Trommetter, 2017.). La note de 3 n'a pas été attribuée, car certaines zones commerciales ou industrielles sont parfois déjà « saturées» en termes d'artificialisation, ou ne sont pas en reconversion, et ne peuvent donc pas forcément accueillir du photovoltaïque au sol.

#### **Espaces ouverts urbains et zones de loisirs : Note de 0 (Exclusion)**

Bien que les espaces ouverts urbains ou zones de loisirs puissent apparaître comme disponibles, elles sont exclues pour des raisons de conflit d'usage et d'acceptabilité sociale. Ces zones sont souvent destinées à des activités récréatives, sociales ou sportives, et l'implantation de centrales photovoltaïques pourrait interférer avec leur fonctionnement originel.

De plus, comme pour les zones urbanisées, l'introduction de centrales photovoltaïques dans des espaces de loisirs pourrait générer des résistances communautaires importantes.

#### **Terres arables : Note de 1 (Peu favorable)**

Les terres arables sont classées peu favorables en raison de conflits d'usage avec l'agriculture. Bien que ces terres soient encore agricoles, elles sont souvent utilisées pour des cultures alimentaires essentielles, et leur reconversion en terrain photovoltaïque pourrait affecter la sécurité alimentaire.

Cependant, dans le cadre de projets agrivoltaïques ou sur des terres moins productives, des solutions peuvent être envisagées, c'est pourquoi ici la note de 0 n'a pas été attribuée.

#### **Cultures permanentes : Note de 1 (Peu favorable)**

Les cultures permanentes, telles que les vergers ou les vignes, de la même manière que pour les terres arables, sont également peu favorables à l'implantation de photovoltaïques au sol, en raison de l'utilisation intense des sols. Ces terres sont souvent très productives et sont directement liées à des activités agricoles de long terme (vignes, oliviers), rendant leur reconversion peu viable sans perte significative en rendement agricole.

L'implantation d'installations photovoltaïques dans ces zones pourrait également altérer l'équilibre écologique ou créer des conflits avec les propriétaires agricoles (cf. INRA, 2020, sur l'impact de l'agrivoltaïsme dans les zones agricoles sensibles).

Mais parfois, des projets d'agrivoltaïsme sont envisagés sur ce genre de terrain, ce qui explique la note de 1.

#### **Prairie : Note de 2 (Favorable)**

Les prairies sont favorables à l'implantation de panneaux photovoltaïques car il y a moins de conflits d'usage. Ces zones sont souvent moins productives en termes agricoles comparées aux

terres arables ou aux cultures permanentes, offrant ainsi un espace disponible pour des installations solaires.

Les prairies peuvent également bénéficier de la coexistence avec les projets photovoltaïques, qui ne nuisent pas à leur écosystème, tout en permettant de produire de l'énergie renouvelable.

### **Zones agricoles complexes ou en mutation : Note de 2 (Favorable)**

Les zones agricoles complexes ou en mutation sont classées favorables, bien qu'elles puissent présenter des contraintes. Ces zones, souvent en transition ou en reconversion, sont intéressantes pour la flexibilité dans l'utilisation du sol et l'optimisation des terres. Ces terres peuvent être partiellement ou totalement inutilisées à un moment donné, ce qui ouvre la possibilité d'intégrer des projets photovoltaïques. De plus, dans ces zones, des solutions comme l'agrivoltaïsme peuvent être envisagées, permettant à la fois la culture de plantes et la production d'énergie solaire.

### **Forêt : Note de 1 (Peu favorable)**

Les zones forestières sont classées peu favorables en raison des conflits d'usage potentiels, en particulier pour des raisons environnementales. Les forêts sont des réservoirs de biodiversité essentiels et jouent un rôle clé dans la régulation du climat. Leur transformation en zones photovoltaïques peut entraîner des perturbations écologiques, notamment pour la faune et la flore locales.

Cependant, dans la classification du MOS, les forêts peuvent parfois être regroupées sous la catégorie plus large des "forêts et milieux semi-naturels", qui inclut certains espaces ouverts à faible densité de végétation. Ces derniers peuvent, dans certains cas, présenter un bon potentiel pour l'implantation de photovoltaïque au sol. Afin d'éviter une exclusion trop large et de conserver une approche ouverte du potentiel, nous avons choisi de classer ces zones en 1 (peu favorable), bien que nombre d'entre elles pourraient également être classées en 0 (exclusion). Des projets de reboisement ou de gestion durable peuvent toutefois permettre une cohabitation avec des projets solaires dans certaines zones spécifiques.

### **Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée : Note de 2 (Favorable)**

Les milieux à végétation arbustive ou herbacée peuvent être favorables en raison de la faible concurrence agricole. Ces terrains sont souvent sous-utilisés ou ne sont pas nécessaires à des pratiques agricoles à grande échelle.

De plus, l'implantation photovoltaïque sur ces terres présente un faible impact environnemental et peut même être bénéfique pour la biodiversité en réduisant l'intensité des activités humaines.

### **Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation : Note de 3 (Très favorable)**

Les espaces ouverts, sous-utilisés et à faible végétation sont classés très favorables pour l'implantation de centrales photovoltaïques, en raison du faible impact environnemental. Ces zones sont souvent naturellement dégagées et sont déjà des espaces peu exploités, ce qui permet une installation rapide et efficace sans perturber l'écosystème.

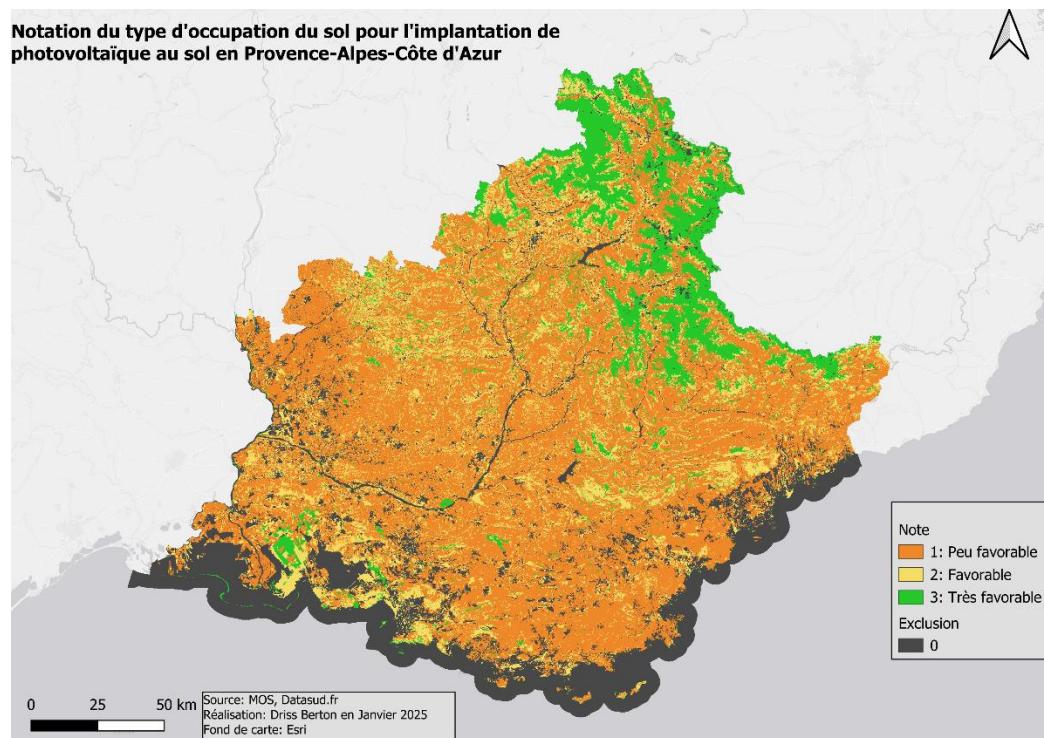
La faible densité de végétation réduit également les coûts liés à la préparation du sol, permettant une utilisation optimale de l'espace.

### Mines, décharges et chantiers : Note de 3 (Très favorable)

Les anciennes mines, décharges ou chantiers sont des zones idéales pour l'installation de panneaux photovoltaïques, car ce sont des surfaces déjà dégradées. Ces zones sont déjà artificialisées ou dégradées, et leur reconversion en espace photovoltaïque permet de réhabiliter des sites pollués tout en produisant de l'énergie renouvelable (en adéquation avec le ZAN). De plus, l'impact sur l'environnement naturel y est minime.

### Zones humides intérieures, eaux maritimes, continentales et zones humides maritimes : Note de 0 (Exclusion)

Ce genre de zones est exclu de tout projet photovoltaïque en raison de leur rôle crucial dans le maintien de la biodiversité, la régulation du cycle de l'eau et la protection contre les inondations. Leur transformation en terrain photovoltaïque aurait des conséquences écologiques majeures. De plus, ce sont en général des zones fortement impactées par les inondations, où le raccordement électrique peut être dangereux et où il est risqué d'y installer du photovoltaïque au sol.



Carte 14 : Reclassement de l'occupation du sol en PACA

Pour ce qui est du critère de l'occupation du sol uniquement, on remarque que les zones les plus favorables à l'implantation de photovoltaïque au sol sont concentrées dans la moitié nord-est de la région, notamment dans les Alpes-de-Haute-Provence, à l'est du Vaucluse, le nord du Var, ainsi qu'une partie du nord des Alpes-Maritimes (*cf. carte 14*).

Ces territoires se caractérisent par la présence d'espaces ouverts à faible couverture végétale, de terrains en friche, de milieux herbacés ou arbustifs, ou encore d'anciennes zones de carrière ou d'exploitation. Ces milieux sont peu contraints d'un point de vue agricole ou résidentiel, ce qui les rend propices à l'implantation de centrales photovoltaïques. Leur éloignement des centres urbains renforce leur potentiel en termes d'acceptabilité sociale. En dehors des milieux naturels ouverts, les autres zones très favorables, comme les anciennes mines, décharges ou chantiers, apparaissent de manière plus ponctuelle et moins structurée spatialement. Leur répartition est discontinue à l'échelle régionale, avec des occurrences localisées souvent liées à des contextes urbains ou industriels spécifiques, ce qui limite leur contribution globale au gisement potentiel, malgré leur excellent profil en termes de reconversion foncière.

Les zones notées 2, considérées comme favorables à l'implantation de photovoltaïque au sol, présentent une répartition spatiale plus diffuse à l'échelle régionale (*cf. carte 14*). Cette relative dispersion s'explique par la nature même des types d'occupation du sol associés à cette note : prairies, mosaïques agricoles en mutation, milieux herbacés ou arbustifs, voire zones industrielles ou commerciales.

Ces catégories correspondent souvent à des espaces de transition, situés à la marge des grands ensembles agricoles, naturels ou urbains. Elles traduisent des dynamiques foncières complexes, entre déprise agricole, mutations des paysages ruraux, développement périurbain ou requalification de friches industrielles. Leur présence est donc moins homogène que les forêts (souvent continues) ou que les milieux ouverts (plus regroupés), et s'inscrit dans une logique morcelée, parfois en lien avec des contextes locaux (zones d'activités, reconversions, pratiques agricoles extensives...).

Ainsi, cette dispersion géographique reflète le caractère hybride de ces occupations du sol, qui ne relèvent ni d'un usage très contraint, ni d'un gisement foncier pleinement optimisé, mais offrent malgré tout des opportunités localisées et parfois stratégiques pour le développement de projets solaires.

Ensuite, les zones notées 1 sont très largement dominantes (*cf. carte 14*). Ces zones couvrent une grande partie du sud de la région, en particulier dans les Bouches-du-Rhône, la plaine littorale varoise, les pourtours urbains de Marseille, Toulon et Nice, ainsi que de nombreux secteurs périurbains ou agricoles intensifs.

Ces zones correspondent principalement à des terres arables, des cultures permanentes (vignes, oliveraies), ou encore à des forêts et boisements denses. Malgré une accessibilité souvent intéressante, elles présentent des conflits d'usage notables, que ce soit avec la production agricole ou la préservation des milieux boisés. Ainsi, on voit qu'en ce qui concerne l'occupation du sol, une très grande majorité de la région PACA est peu favorable à l'implantation photovoltaïque.

Enfin, en ce qui concerne les zones notées 0 (exclues), on y repère clairement les espaces urbanisés, les zones littorales très artificialisées qui connaissent déjà une certaine saturation foncière (Marseille, Toulon, Nice), les zones humides (Camargue, étangs côtiers) et les grands ensembles résidentiels comme étant exclus de l'implantation (*cf. carte 14*).

Cela souligne le choix méthodologique consistant à éviter tout double usage de sols artificialisés ou à proximité immédiate des populations. À noter qu'il pourrait y avoir beaucoup plus de zones notées 0, notamment à cause des forêts qui, comme mentionné plus haut, couvrent une grande partie de la région et sont en général exclues des analyses d'implantation photovoltaïque au sol. Cependant, afin d'éviter une exclusion trop large de zones potentiellement acceptables, nous avons choisi de nuancer cette approche.

En effet, certaines zones classées comme "forêts" au niveau 2 du MOS correspondent en réalité, au niveau 3, à des milieux beaucoup plus ouverts, avec seulement des arbustes dispersés ou une végétation de type herbacée. Ce flou de classification justifie le choix d'une notation plus souple, permettant de ne pas écarter automatiquement des terrains qui pourraient présenter un bon potentiel malgré leur étiquette forestière apparente.

## **2.4 Élaboration de scénarios théoriques : variation des pondérations des critères**

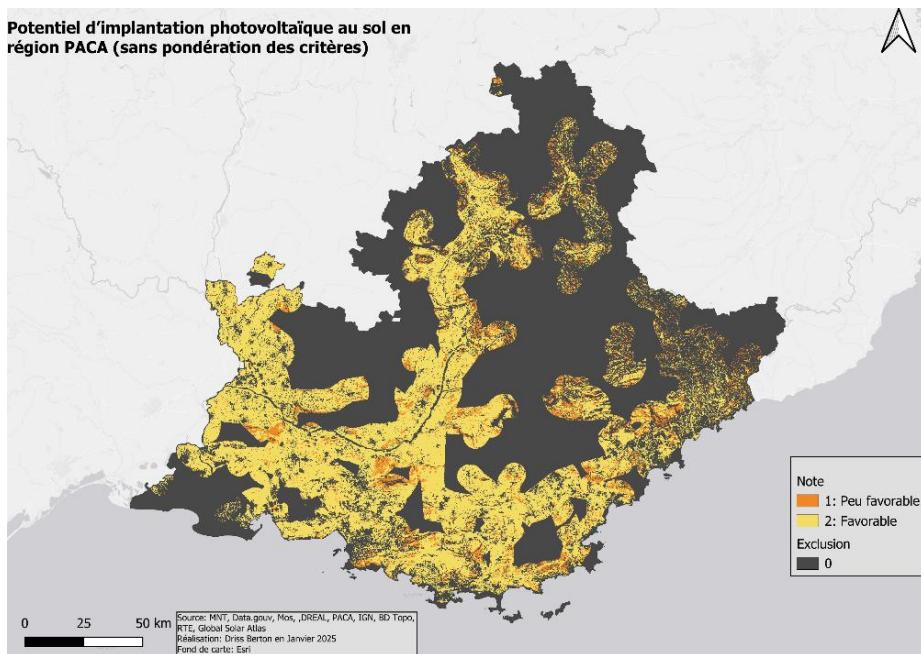
Afin de mieux comprendre l'influence respective de chaque critère dans l'évaluation du potentiel photovoltaïque au sol, cette section propose de tester plusieurs scénarios de pondération. L'objectif est d'observer dans quelle mesure la variation des poids attribués aux critères peut modifier la répartition spatiale des zones jugées favorables à l'implantation, à l'échelle de la région PACA.

Ces pondérations ont été construites à partir de logiques réalistes et opérationnelles, en lien avec les différents types d'acteurs ou d'objectifs liés à un projet photovoltaïque (optimisation de la production, limitation des impacts environnementaux, faisabilité technique, approche équilibrée...).

Il s'agit ainsi de voir s'il existe des écarts marqués entre les cartes produites, ou si, à l'inverse, certaines zones ressortent systématiquement quel que soit le scénario retenu ce qui pourrait traduire un potentiel structurel fort, indépendant des priorités choisies.

### **Scénario 1 : Pondération égale des critères**

Dans ce premier scénario, aucune pondération n'a été appliquée aux critères. Ainsi, dans l'analyse multicritère, tous les critères ont le même poids et la même importance dans l'analyse (pour de l'implantation photovoltaïque au sol).



Carte 15: Potentiel d'implantation photovoltaïque au sol sans pondération

La *carte 15* met en évidence une forte structuration régionale du potentiel d'implantation, avec un contraste clair entre les zones exclues, les zones peu favorables et les zones favorables (*cf. carte 15*). On note une répartition en taches disjointes, organisées autour de quelques grands axes ou secteurs. Les zones favorables (note 2) apparaissent fréquemment dans les plaines du Vaucluse et du sud des Alpes-de-Haute-Provence, le nord du Var (secteurs intermédiaires entre forêts, prairies et infrastructures), le bassin de l'étang de Berre, la Crau, la Camargue hors zones humides protégées, ainsi que dans des secteurs en frange d'infrastructures (lignes HTA, postes, routes), où les critères de raccordement et de pente convergent.

Cette structuration reflète les zones où les critères cumulés de pente modérée, proximité au réseau, occupation du sol compatible et contrainte réglementaire raisonnable s'alignent, sans nécessairement atteindre l'optimum. En effet, le fait qu'aucune zone ne soit notée 3 (très favorable) souligne que le cumul parfait de tous les critères reste rare, du moins sans pondération.

Les zones peu favorables (note 1) se situent en périphérie des zones favorables, souvent dans des secteurs à pente intermédiaire ou à accessibilité limitée : mosaïques agricoles, milieux boisés légers, ou zones relativement ou légèrement éloignées des infrastructures, sans être trop éloignées non plus (lignes, postes...).

Enfin, les zones exclues (note 0) forment un bloc significatif, notamment dans le nord des Alpes-Maritimes, le centre-est du Var et le sud du massif alpin, où se cumulent pente élevée, éloignement au réseau et multiples protections environnementales. Également autour des grandes agglomérations littorales (Marseille, Toulon, Nice), l'urbanisation et l'artificialisation du sol entraînent souvent l'exclusion directe.

On remarque néanmoins que la structuration du potentiel d'implantation photovoltaïque au sol s'aligne globalement avec la répartition des lignes électriques aériennes, ainsi qu'avec leur notation.

Note	Description	Nombre de carreaux	Pourcentage (%)
1	Peu favorable	2440810	13,1
2	Favorable	16190684	86,9
3	Très favorable	0	0
Total		18631494	100

Tableau 3 : Répartition des carreaux pour le scénario « sans pondération »

Ces chiffres confirment une très forte majorité de pixels jugés favorables (note 2), ce qui témoigne d'un réservoir de foncier solaire non négligeable dans la région (*cf. tableau 3*). Cependant, l'absence totale de note 3 souligne qu'aucune zone ne cumule tous les critères au maximum, ici sans pondération on peut penser que chaque critère a la même influence, ce qui tend donc à lisser les résultats et à empêcher l'émergence de zones d'excellence.

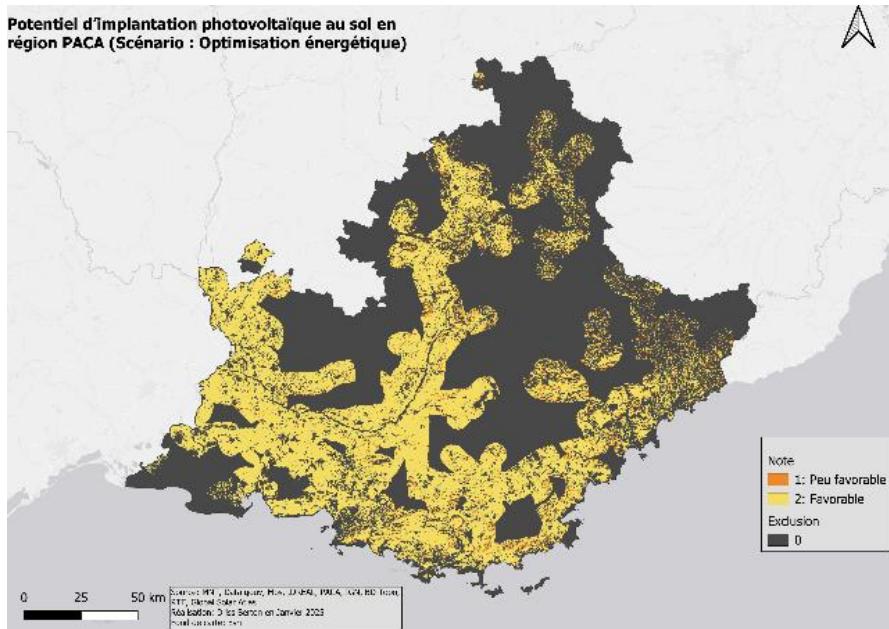
Cela suggère aussi que même les meilleures zones sont encore soumises à un ou deux freins (réglementaires, d'accès, de pente ou d'usage du sol) qui les empêchent d'atteindre la note maximale.

## Scénario 2 : Optimisation énergétique

Ici ce scénario est dans une logique de maximisation de la production d'électricité en favorisant les zones au fort potentiel solaire et à la topographie adaptée. Ce scénario est adapté pour des développeurs cherchant des rendements énergétiques maximaux. Voici la pondération appliquée :

Potentiel solaire	35%
Pente	20%
Distance aux lignes électriques	15%
Distances aux postes	10%
Occupation du sol	10%
Distance aux routes	5%
Réglementation environnementale	5%

Tableau 4 : Pondération appliquée pour le scénario « Optimisation énergétique »



Carte 16: Potentiel d'implantation photovoltaïque au sol (scénario optimisation énergétique)

Dans les faits la répartition du potentiel ici n'est pas bien différente de celle sans pondération avec toujours l'absence de zones notées 3 (*cf. carte 16 et tableau 5*)

Toutefois, l'analyse statistique révèle des évolutions notables dans la répartition des classes

Note	Description	Nombre de carreaux	Pourcentage (%)
1	Peu favorable	1201866	6,45
2	Favorable	17429628	93,55
3	Très favorable	0	0
Total		18631494	100

Tableau 5 : Répartition des carreaux pour le scénario « Optimisation énergétique »

Par rapport au scénario initial sans pondération, la part de pixels notés "favorables" (note 2) augmente significativement (+6,6 points), tandis que les pixels "peu favorables" (note 1) diminuent presque de moitié. Ce glissement résulte directement du poids renforcé accordé aux critères énergétiques (potentiel solaire à 35 %, pente à 20 %, distance aux lignes à 15 %), au détriment des critères plus secondaires comme les routes, les contraintes environnementales ou même l'occupation du sol.

Cette pondération énergétique donne davantage de poids aux secteurs ensoleillés, accessibles en réseau et bien exposés, même si ceux-ci peuvent présenter des occupations du sol moins idéales ou une contrainte réglementaire modérée. Cela explique pourquoi certaines zones classées « peu favorables » dans le scénario initial basculent ici en « favorables ». Le critère principal devient la performance énergétique attendue, plus que la compatibilité d'usage ou la facilité réglementaire.

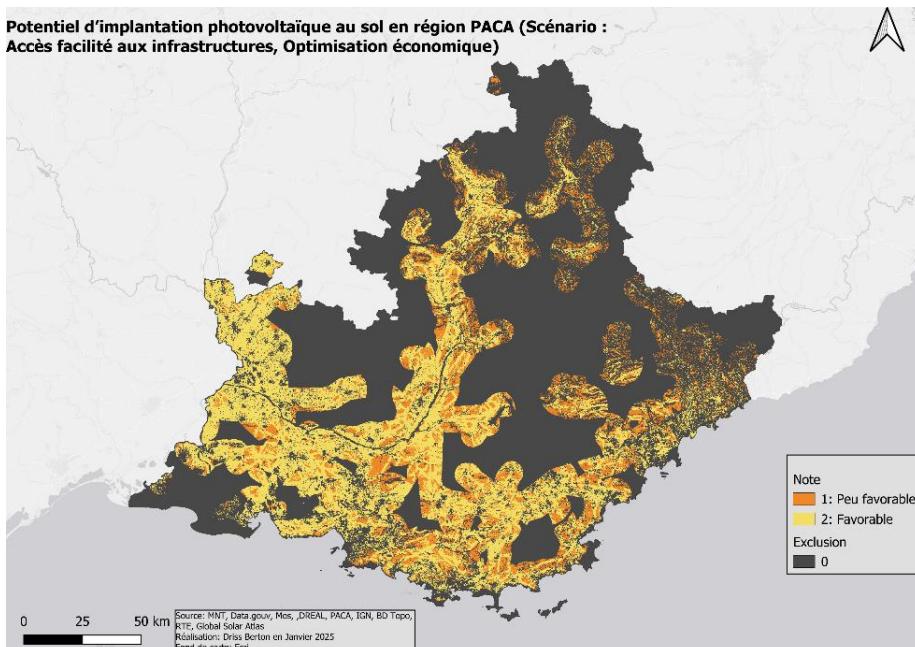
À l'inverse, l'absence persistante de zones notées 3 montre que, même avec pondération, le cumul optimal reste introuvable dans les conditions actuelles. Cela témoigne de la difficulté à concilier tous les critères, même en valorisant ceux à fort enjeu énergétique.

### Scénario 3: Accès facilité aux infrastructures, Optimisation économique

Ce scénario a pour but de réduire les coûts de raccordement au réseau et les contraintes d'accessibilité logistique. Ce scénario vise des implantations simples, efficaces et rapidement rentables. Voici la pondération de ce scénario :

Distance aux lignes aériennes	25%
Distance aux postes électriques	20%
Distances aux routes	15%
Potentiel solaire	20%
Pente	5%
Occupation du sol	5%
Réglementation environnementale	5%

Tableau 6 : Pondération du scénario « Accès facilité aux infrastructures, Optimisation économique »



Carte 17 : Potentiel d'implantation photovoltaïque (scénario : Accès facilité aux infrastructures, Optimisation économique)

La carte 17 montre une concentration accrue des zones favorables le long des grands corridors d'infrastructure notamment au niveau du Sud des Bouches-du-Rhône, Crau et étang de Berre, des Plaines du Vaucluse et de l'ouest varois, et enfin dans les secteurs traversés par de grands axes routiers et électriques, notamment le sillon Rhône-Durance, les abords de l'A51 et les interconnexions RTE.

À l'inverse, de nombreuses zones qui étaient classées “favorables” dans les autres scénarios passent ici en “peu favorables”, cela inclut des secteurs bien ensoleillés mais éloignés des réseaux, ou difficiles d'accès logistique (zones de montagne, arrière-pays peu desservi). Ces zones sont fortement pénalisées dans une logique strictement économique, malgré leur potentiel énergétique.

Note	Description	Nombre de carreaux	Pourcentage (%)
1	Peu favorable	5548072	29,78
2	Favorable	13083422	70,22
3	Très favorable	0	0
Total		18631494	100

Tableau 7 : Répartition des carreaux pour le scénario Accès facilité aux infrastructures, Optimisation économique »

Cette fois-ci, la proportion de zones peu favorables (presque 30 %) est la plus élevée parmi les trois scénarios analysés pour l'instant. À l'inverse, les zones favorables chutent nettement, bien que représentant encore une majorité. Ce résultat reflète la sélectivité accrue du scénario, les zones mal desservies ou peu connectées, même à bon potentiel solaire, sont automatiquement dévalorisées dans ce cadre économique.

Ce scénario illustre de manière nette le rôle structurant des infrastructures dans la faisabilité économique des projets. Là où l'optimisation énergétique valorisait le rendement solaire et la pente, ici ce sont les coûts de raccordement et d'aménagement qui prennent le dessus. Cela entraîne une reconfiguration significative de la carte des zones favorables.

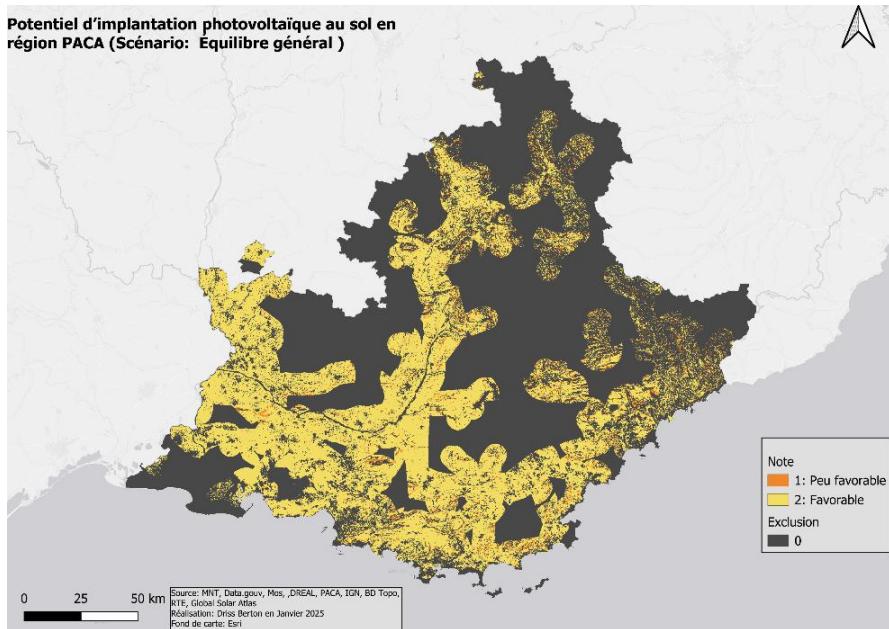
La forte part de zones “peu favorables” (cf. tableau 7) met aussi en évidence le fait que beaucoup de zones énergétiquement performantes sont encore mal desservies, ce qui constitue un frein à leur développement à court terme dans un cadre économique contraint.

#### Scénario 4 : Équilibre général

Ce scénario permet d'offrir une vision équilibrée prenant en compte l'ensemble des enjeux : production, faisabilité, environnement, et intégration territoriale. Ce scénario vise tout de même à prioriser certains critères qui apparaissent logiquement plus déterminants que d'autres dans le cadre de l'implantation de photovoltaïque au sol, tout en veillant à ne négliger aucun critère dans la pondération. Voici la pondération :

Potentiel solaire	25%
Pente	15%
Distances aux lignes aériennes	15%
Distances aux postes électriques	10%
Occupation du sol	15%
Distance aux routes	10%
Réglementation environnementale	10%

Tableau 8 : Pondération du scénario « Équilibre général »



Carte 18: Potentiel d'implantation photovoltaïque au sol (scénario Équilibre général)

La structure des zones favorables s'inscrit dans la continuité des scénarios précédents. On retrouve une large bande favorable traversant les Bouches-du-Rhône, le sud du Vaucluse, le centre Var et une partie des Alpes-de-Haute-Provence, là où se conjuguent bon ensoleillement, accessibilité au réseau, faible pente et moindre pression réglementaire.

En revanche, certaines zones marginales, notamment les franges alpines ou les secteurs boisés sous protection, restent classées "peu favorables". Ce sont des territoires où l'un ou plusieurs des critères (souvent la pente, la réglementation ou la faible accessibilité) viennent limiter la compatibilité globale.

Note	Description	Nombre de carreaux	Pourcentage (%)
1	Peu favorable	1267667	6,8
2	Favorable	17363827	93,2
3	Très favorable	0	0
Total		18631494	100

Tableau 9 : Répartition des carreaux pour le scénario « Équilibre général »

Les zones favorables représentent ici plus de 93 % du territoire retenu, un niveau quasiment équivalent au scénario "optimisation énergétique". À l'inverse, les zones "peu favorables" restent minoritaires et concernent environ 7 % (*cf. carte 18 et tableau 9*) des pixels. Aucune zone n'obtient encore la note maximale (3), ce qui reflète une certaine exigence globale du modèle, où aucun secteur ne cumule tous les critères à un niveau optimal pour l'instant.

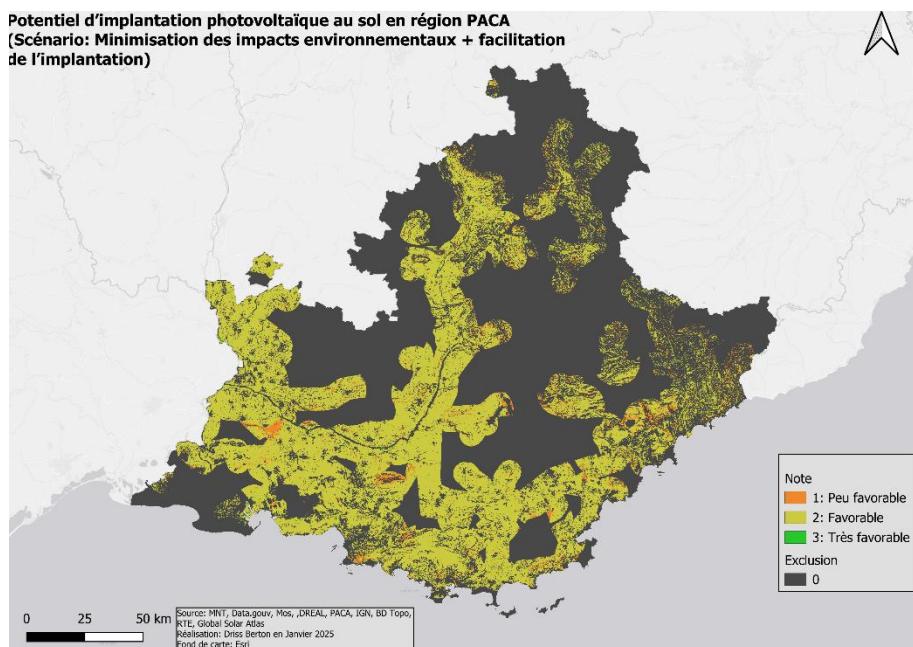
Le scénario "Équilibre général" se distingue par sa stabilité territoriale : il ne privilégie pas excessivement un facteur au détriment des autres, contrairement aux scénarios "optimisation énergétique" ou "optimisation économique". Cette approche offre une vision plus représentative des compromis à rechercher dans la planification régionale, où l'enjeu est d'identifier les zones conciliant performance, faisabilité et acceptabilité.

## Scénario 5 : Minimisation des impacts environnementaux + facilitation de l'implantation

Ici ce scénario vise à préserver les espaces naturels sensibles tout en facilitant l'implantation en termes de faisabilité technique et réglementaire. On vise un compromis entre respect écologique et réalité opérationnelle. Voici la pondération :

Occupation du sol	25%
Réglementation environnementale	25%
Potentiel solaire	15%
Pente	10%
Distance aux lignes électriques aériennes	10%
Distance aux postes électriques	10%
Distance aux routes	5%

Tableau 10 : Pondération pour le scénario « Minimisation des impacts environnementaux + facilitation de l'implantation »



Carte 19: Potentiel d'implantation photovoltaïque au sol (scénario «Minimisation des impacts environnementaux + facilitation de l'implantation

Ce scénario présente pour la première fois (et est aussi le seul scénario dans ce cas-là) des zones notées 3 mais leur faible nombre et leur dispersion ne permettent pas de les localiser précisément à l'échelle régionale. Cela confirme leur caractère ponctuel et exceptionnel : après vérification, il s'agit en effet de parcelles précises correspondant à d'anciennes mines, anciennes décharges ou à des anciennes zones incendiées (espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation). Ces zones sont notées 3 dans le critère d'occupation du sol, qui possède ici la pondération majoritaire. De plus, le critère du nombre de réglementations environnementales, qui a un poids significatif dans ce scénario, comporte-lui aussi beaucoup de zones notées 3, car il est généralement plus rare d'avoir de nombreuses zones soumises à des réglementations environnementales strictes que l'inverse. Enfin, le caractère ponctuel (ou diffus) des zones notées 3 s'explique par le fait que les anciennes mines, décharges ou anciennes zones incendiées sont relativement rares et surtout dispersées à l'échelle régionale, sans réelle continuité spatiale.

Note	Description	Nombre de carreaux	Pourcentage (%)
1	Peu favorable	932635	5,01
2	Favorable	17676024	94,87
3	Très favorable	22835	0,12
Total		18631494	100

Tableau 11 : Répartition des carreaux pour le scénario « Minimisation des impacts environnementaux + facilitation de l’implantation »

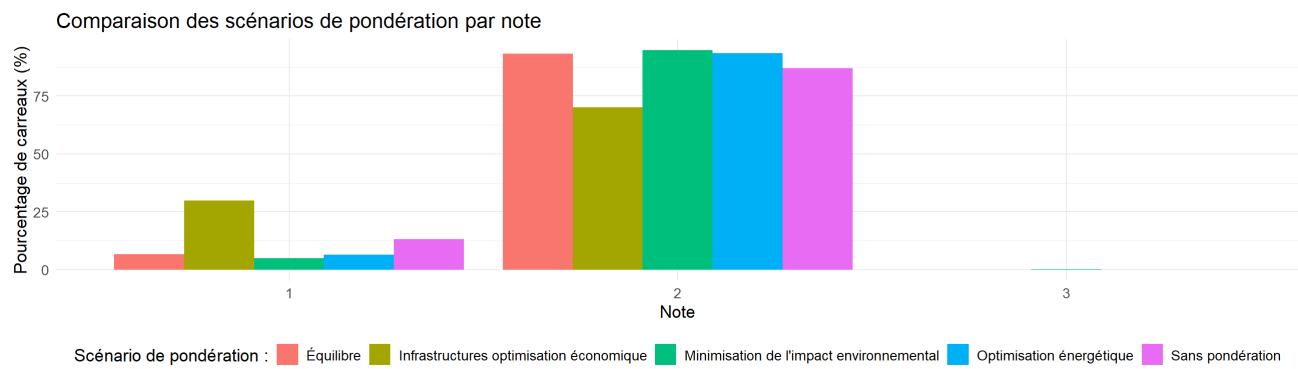
Pour le reste en termes de structuration générale, la carte 19 conserve les mêmes logiques spatiales que les précédentes, avec une prédominance des zones favorables dans les plaines du sud de la région, autour du bassin de l’étang de Berre, dans la Crau, le sud du Vaucluse, le centre du Var et certaines vallées intérieures des Alpes-de-Haute-Provence. Les zones montagneuses ou forestières protégées restent classées comme peu favorables ou exclues.

Ce scénario se distingue donc très nettement des précédents, puisqu’il s’agit du premier (et du seul) à générer des zones notées 3 (très favorables). Ces dernières restent très minoritaires mais marquent un changement qualitatif important, en identifiant des secteurs d’implantation où l’ensemble des critères sont réunis de façon optimale.

La part des zones “peu favorables” tombe ici à 5 %, (*cf. tableau 11*) le taux le plus bas observé jusque-là. Ce scénario montre qu’en privilégiant les critères réglementaires et fonciers, il est possible d’identifier des zones optimales d’un point de vue institutionnel et écologique, sans pour autant sacrifier les aspects techniques et énergétiques.

En revanche, le très faible nombre de zones notées 3 (0,12 % *cf. tableau 11*) témoigne du niveau d’exigence élevé requis pour répondre parfaitement à l’ensemble des critères. De plus ces rares zones sont très diffuses sur le territoire.

Le graphique 3 met en évidence les écarts de répartition des pixels selon les notes attribuées dans chaque scénario de pondération.



Graphique 3 : Comparaison des scénarios de pondération

Sans surprise, la note 2 (favorable) domine largement dans tous les scénarios, ce qui confirme le caractère médian et intermédiaire de la majorité des zones après agrégation multicritère. Cependant, des différences notables apparaissent selon les logiques de pondération. Le scénario « Infrastructures optimisation économique » est celui qui présente le plus de zones peu favorables (note 1) et le moins de zones favorables (note 2), traduisant un positionnement plus restrictif spatialement. Ce résultat s’explique par la forte pondération accordée à la proximité

aux réseaux (postes, lignes, routes), des éléments rares à l'échelle régionale, ce qui écarte de nombreux espaces potentiels. À l'inverse, le scénario « Minimisation de l'impact environnemental », qui combine une pondération élevée pour l'occupation du sol et les réglementations environnementales, présente le plus grand nombre de pixels notés 3.

Cela confirme que ce scénario cible des zones très spécifiques comme les anciennes décharges, les friches industrielles ou encore les zones incendiées qui, bien que rares et dispersées, sont considérées ici comme très favorables. Leur caractère ponctuel et diffus à l'échelle régionale est cohérent avec leur nature, puisqu'il s'agit de zones souvent isolées, non continues spatialement, et peu répandues. Le scénario « Équilibre » se place logiquement entre tous les autres, avec une répartition homogène, sans extrêmes, traduisant une approche pondérée qui ne privilie aucun critère de manière excessive. Enfin, les scénarios « Optimisation énergétique » et « Sans pondération » présentent des profils similaires, avec une surreprésentation des notes 2. Cela reflète la large disponibilité de zones bien exposées et faiblement pentues dans la région PACA, mais souligne aussi une certaine limite, ces scénarios peuvent avoir tendance à lisser les contraintes territoriales et surestimer le potentiel brut si l'on ne prend pas en compte d'autres facteurs limitants

Globalement, la plupart des scénarios suivent une trajectoire similaire, avec une très forte présence de la note 2 (favorable), ce qui traduit une tendance centrale dans la répartition des scores. Toutefois, on remarque que le scénario « Infrastructures optimisation économique » se démarque nettement des autres, avec une part plus faible de pixels notés 2 et, à l'inverse, une part beaucoup plus importante de pixels notés 1 (peu favorable), ce qui révèle une exigence spatiale plus forte et donc un scénario plus sélectif. À l'opposé, le seul scénario à faire apparaître, même de manière très limitée, des pixels notés 3 (très favorable) est le scénario « Minimisation de l'impact environnemental » (et facilitation de l'implantation), ce qui confirme le caractère très spécifique et ponctuel des zones identifiées comme optimales dans ce cas. On pourrait alors être tenté de considérer ces deux scénarios comme des cas « à part », tandis que les autres, du fait de leur proximité graphique, apparaîtraient comme les seuls réellement viables. Mais en réalité, tout dépend du point de vue adopté, des priorités fixées à un instant donné par les porteurs de projet, ainsi que des caractéristiques propres aux terrains étudiés. Chaque scénario peut ainsi s'avérer pertinent en fonction de ses conditions d'application concrètes, et il ne s'agit donc pas de désigner un « bon » ou un « mauvais » scénario, mais bien de proposer une grille de lecture flexible, adaptée aux différents contextes territoriaux et aux logiques d'aménagement visées.

### **3. Confrontation du potentiel théorique avec les projets d'implantation de photovoltaïque au sol engagés**

#### **3.1 Analyse statistique de la correspondance entre les résultats de l'analyse multicritères et les permis délivrés**

Pour vérifier si le modèle issu de la carte multicritère est cohérent avec les réalités du terrain, une analyse statistique est menée afin de comparer la présence effective de permis photovoltaïques avec la répartition des notes à l'échelle des parcelles. Pour cela, il est nécessaire de retenir l'un des scénarios présentés précédemment. Comme évoqué plus haut, il n'existe pas

de « bon » scénario unique, d'autant que la répartition des résultats reste globalement similaire d'un scénario à l'autre. Le scénario « équilibre » a donc été retenu, car il représente la tendance La plus en phase avec l'importance des critères telle que nous la définissons à partir de nos lectures et entretiens parmi les options proposées. Il faut déjà noter qu'en tout il y'a 4,9 millions de parcelles bâties et non bâties dans la région paca (4,941,067 précisément) pour seulement 1923 d'entre elles qui sont concernées par un permis donc environ 0,039 % des parcelles de la région PACA sont concernées par un permis photovoltaïque au sol. Ce très faible chiffre s'avère tout à fait cohérent, dans la mesure où les parcelles constituent une réserve foncière à vocation multiple, dont l'usage ne se limite ni au domaine énergétique, ni seulement à du photovoltaïque au sol. (*Le Gentil, Mongruel, Kalaydjian, 2012*), (*Mesnard, C. 2019.*). En effet les réserves foncières rurales et périurbaines très présentes dans la région PACA servent principalement à des usages agricoles, mais aussi à des usages sociaux, territoriaux et touristiques et possèdent également un cadrage institutionnel fort.

Pour ce scénario, 1495 parcelles disposant d'un permis photovoltaïque au sol sont notées favorables à l'installation de photovoltaïque au sol, ce qui représente 77,7 % des parcelles avec un permis en région PACA, contre seulement 2 parcelles avec un permis noté peu favorable (0,10 %) et 426 parcelles avec permis noté 0, ce qui représente environ 22 % de toutes les parcelles avec permis dans la région PACA. (*cf. tableau 12*)

Notes	Absence d'un permis (0)	Présence d'un permis (1)
Exclusion (0)	3121039	426
Peu favorable (1)	64619	2
Favorable (2)	1753435	1495
Très favorable (3)	0	0

Tableau 12 : Répartition des notes en fonction de la présence ou de l'absence d'un permis

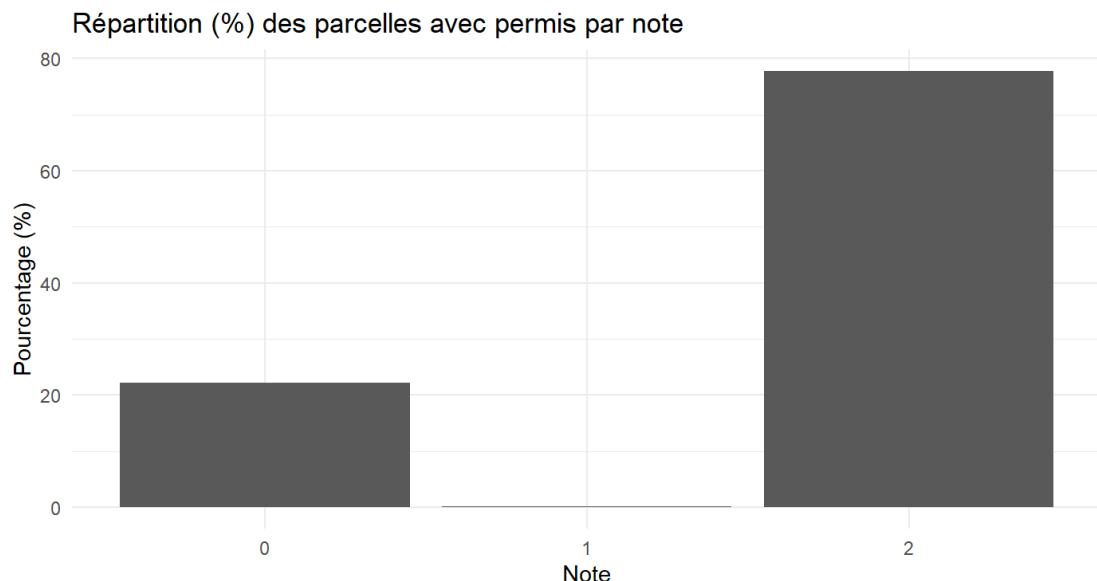
Ainsi, on observe une très large majorité de permis attribués à des parcelles considérées comme favorables selon l'analyse multicritère. En revanche, on remarque que 22 % de ces parcelles sont situées dans des zones notées 0 (*cf. graphique 4*), c'est-à-dire que le modèle ne les identifie normalement pas comme favorables à l'installation de photovoltaïque. Même si ces cas restent largement minoritaires, leur existence montre qu'ils ne correspondent pas totalement au modèle défini par l'analyse multicritère.

Cela peut signifier plusieurs choses, soit ces parcelles constituent des exceptions ce qui est probable compte tenu de leur faible nombre, soit l'analyse multicritère n'a pas capté un ou plusieurs facteurs importants qui rendent ces parcelles attractives pour des projets photovoltaïques, malgré leur faible score.

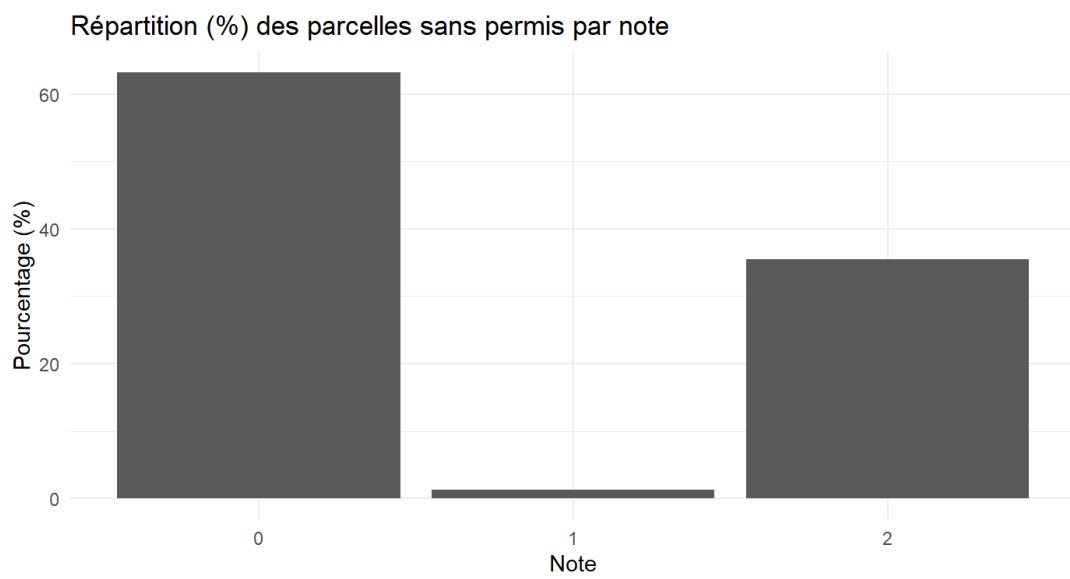
Enfin, le très faible nombre de parcelles avec permis notées peu favorables (note 1) seulement deux cas sur 1923 suggère que cette catégorie intermédiaire n'est quasiment jamais retenue pour des projets. Cela pourrait indiquer soit un manque de différenciation claire dans le modèle entre les notes 0 et 1, soit que les porteurs de projet privilégiennent des zones très clairement identifiées comme favorables (note 2), négligeant les zones marginalement adaptées.

Quand on observe les parcelles qui n'ont pas de permis, on voit que ces dernières sont très majoritairement notées 0 (63,2% de toutes les parcelles sans permis, *cf. Graphique 5*), ce qui

démontre tout de même une certaine cohérence de l'analyse multicritère. Mais on remarque tout de même un nombre très important de parcelles sans permis notées comme favorables (35.5% de toutes les parcelles sans permis), ce qui laisse sous-entendre que la région PACA a encore beaucoup de réserves foncières disponibles pour de l'implantation photovoltaïque au sol. Même si, attention, comme dit plus haut, ces parcelles sont théoriquement compatibles, elles sont peut-être réservées à un autre usage de leur foncier comme l'agriculture ou le tourisme par exemple.



Graphique 4 : Réparation des parcelles avec permis par note (en %)



Graphique 5 : Réparation des notes des parcelles sans permis (en %)

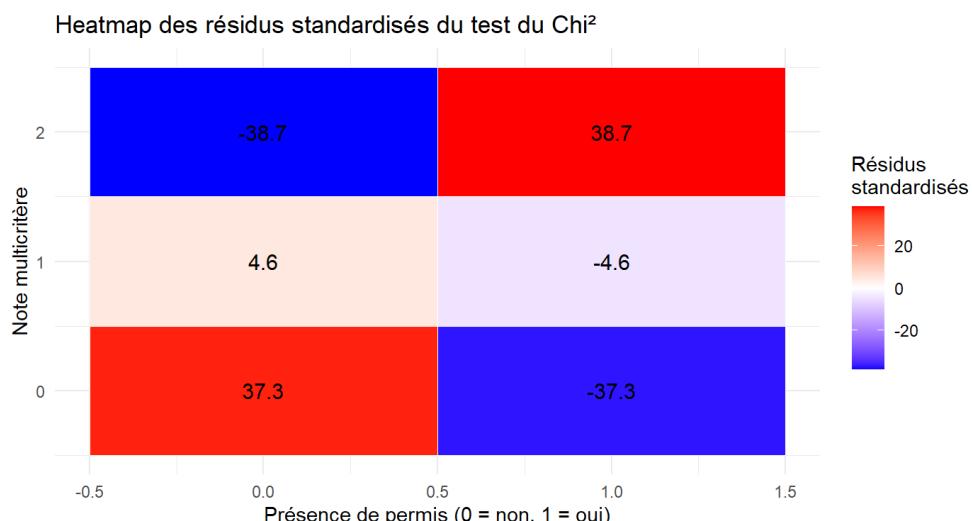
Pour vérifier s'il existe une association statistique significative entre la présence d'un permis (oui, non) et note multicritère attribuée aux parcelles (0, 1 ou 2 ici) le test du Chi2 a été réalisé.

$H_0$  : La présence d'un permis sur une parcelle est indépendante de la note attribuée par la méthode multicritère.

$H_1$  : La présence d'un permis sur une parcelle est liée à la note attribuée par la méthode multicritère.

La valeur très élevée de la statistique du test ( $\chi^2 = 1499,5$ ), combinée à une p-value extrêmement faible ( $< 2.2\text{e-}16$ ), indique que l'hypothèse nulle d'indépendance entre les deux variables peut être rejetée au seuil de 5 % ( $\alpha = 0,05$ ), avec 2 degrés de liberté. Il existe donc une relation statistiquement significative entre la présence de permis et la note attribuée aux parcelles. Ainsi, on rejette  $H_0$  et on confirme  $H_1$ .

Bien que le test du Chi<sup>2</sup> ait révélé une dépendance significative entre la note multicritère et la présence de permis, cette information reste globale. Afin de mieux comprendre la nature et la localisation de cette dépendance, une analyse des résidus standardisés a été réalisée. Cette approche permet d'identifier les combinaisons de modalités (note et présence de permis) qui contribuent le plus à la statistique du Chi<sup>2</sup>, en mettant en évidence les cas surreprésentés ou sous-représentés par rapport à l'indépendance théorique.



Graphique 6 : Heatmap des résidus du Chi2

Pour les parcelles notées 2 avec permis, il y'a beaucoup plus de permis présent que ce qu'on attendrait si les deux variables étaient indépendantes (cf. graphique 6). Il y'a donc une forte surreprésentation des permis sur les parcelles notées 2, ainsi les zones notées comme favorables attirent bien les projets. Ensuite il y'a beaucoup moins de parcelles sans permis que prévu, ces parcelles (celles notées 2) ont bien plus de permis que ce qu'on attendrait par hasard. Cela montre que la note 2 (favorable) est prédictive de l'attribution d'un permis ce qui donne de la crédibilité au modèle. Pour ce qui est des parcelles notées 0, il y'a beaucoup plus de parcelles sans permis que prévu et il y'a beaucoup moins de permis attribués que prévu pour les parcelles notées 0. Cela montre que les zones considérées comme inappropriées pour du photovoltaïque au sol n'attirent pas les projets, comme attendu ce qui confirme les données. Enfin les écarts pour les parcelles avec la note de 1 sont plus faibles mais quand même significatifs.

Globalement les parcelles notées 1 semblent peu utilisées pour des permis (léger rejet), mais l'effet est moins net que pour les extrêmes. (cf figure en dessous)

### **3.2 Analyse cartographique de la correspondance entre les notes multicritères et les permis délivrés**

Afin de valider spatialement l'analyse multicritère produite dans le cadre de ce travail, une confrontation a été opérée entre les zones théoriquement favorables (issues du raster multicritère) et les implantations réelles de projets photovoltaïques au sol (données de permis délivrés).

Cette validation repose sur une méthode en plusieurs étapes, visant à vérifier si les permis délivrés correspondent effectivement aux zones jugées favorables par d'analyse multicritère :

#### **1 / Rappel du raster multicritère :**

Le modèle produit un raster de potentiel combinant plusieurs critères (potentiel solaire, pente, occupation du sol, contraintes réglementaires, proximité aux infrastructures). Chaque pixel reçoit une note de 0 à 3, représentant son niveau de potentiel pour accueillir une centrale photovoltaïque au sol.

#### **2/ Transformation des permis en points :**

La couche des permis, initialement en polygones, a été convertie en centroïdes afin de réaliser une lecture plus directe du raster. Cela permet d'éviter les problèmes de moyenne sur des polygones trop grands ou hétérogènes.

#### **3/ Extraction de la note du raster pour chaque permis :**

À l'emplacement de chaque centroïde, la valeur du raster multicritère (carte de potentiel) a été extraite. Cette opération, assimilable à une extraction zonale ponctuelle, permet d'attribuer à chaque permis une note théorique (entre 0 et 3) issue du modèle multicritère.(la note la plus présente à chaque fois à l'emplacement du permis)

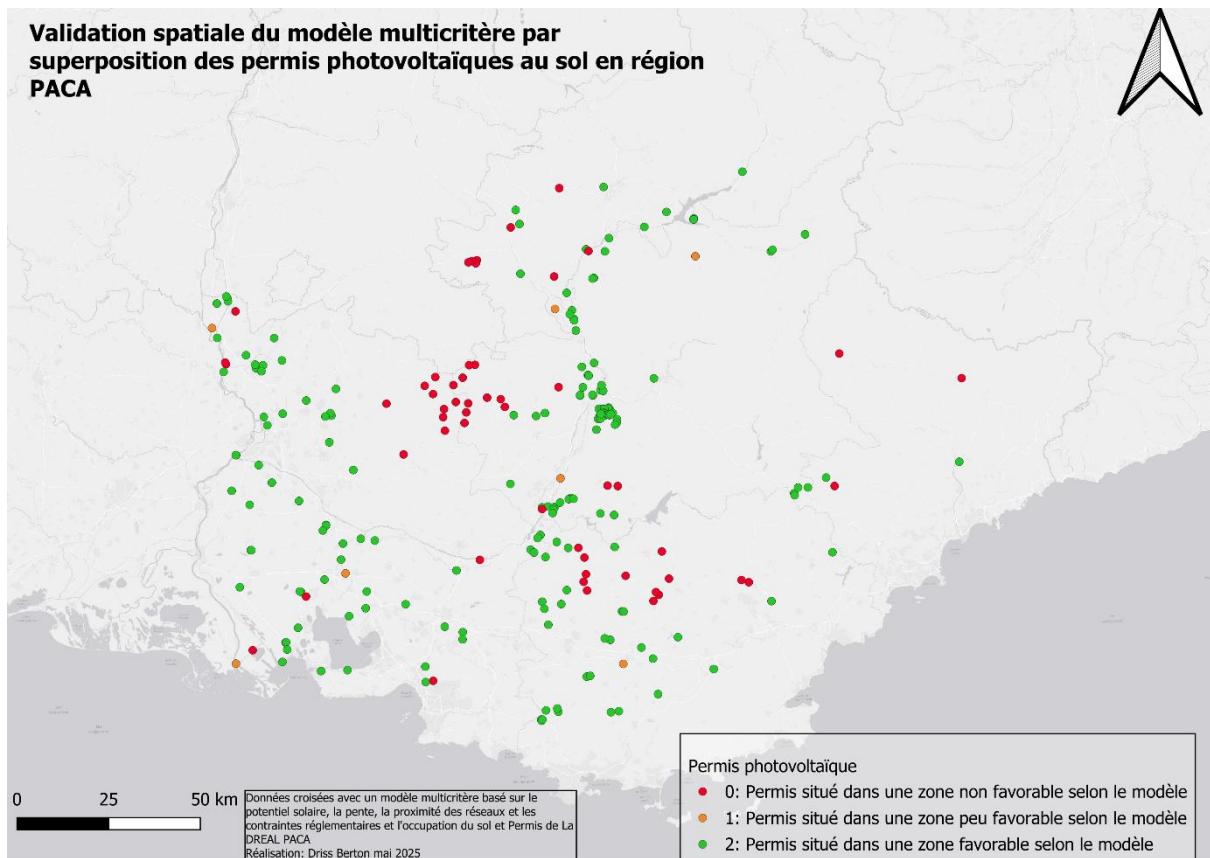
#### **4/ Analyse comparative :**

Cette opération permet de comparer les implantations réelles aux potentiels modélisés, et ainsi de vérifier dans quelle mesure les zones choisies pour les permis correspondent bien aux zones « optimales » selon le modèle.

-Si un permis est localisé dans une zone de note 2 ou 3, on considère qu'il a été bien prédict.

-Si un permis est localisé dans une zone de note 1, on émet certaines réserves sur la bonne prédiction de l'analyse pour ces permis.

-À l'inverse, une note 0 révèle une discordance, suggérant soit une limite du modèle, soit des logiques d'implantation spécifiques (agrivoltaïsme, arbitrage foncier, etc.).



Carte 20 : Validation spatiale du modèle multicritère

On remarque une cohérence globale entre l'analyse multicritère et les permis réellement délivrés. On observe une majorité de permis en zone favorable (classe 2), ce qui vient appuyer les observations réalisées à l'échelle des parcelles. Cependant, on remarque également des cas notables en zone non favorable (classe 0), illustrant soit les limites du modèle, soit des logiques d'exception territoriale (*cf. carte 20*).

Pour ce qui est des permis bien prédis par le modèle (classe 2), ceux-ci sont majoritairement situés dans le sud-est de la région, notamment dans les Bouches-du-Rhône, autour de la Crau, de la Camargue ou des franges de zones agricoles. On en observe également un grand nombre dans le sud du Var. Ces zones cumulent globalement toutes les conditions favorables selon le modèle multicritère : un potentiel solaire élevé, des pentes faibles, une bonne proximité aux infrastructures électriques, peu de contraintes environnementales, et des sols souvent classés 2 ou 3 (zones ouvertes, friches, prairies, etc.). On relève aussi plusieurs permis bien prédis dans le nord-ouest du Vaucluse ainsi qu'au centre et au nord des Alpes-de-Haute-Provence. Ces clusters de permis bien prédis partagent un point commun : des conditions globalement favorables, sans être optimales. Par exemple, dans les Alpes-de-Haute-Provence, certaines implantations se trouvent sur des pentes parfois relativement élevées. Toutefois, ces zones présentent des types d'occupation du sol favorables, voire très favorables, comme des friches agricoles, des prairies, des milieux à végétation herbacée ou des espaces ouverts.

Concernant les permis situés dans des zones peu favorables (classe 1), il s'agit de projets implantés dans des secteurs qui restent compatibles avec le photovoltaïque au sol, mais qui ne

présentent pas les conditions optimales définies par le modèle multicritère. Ces permis sont rares et plutôt dispersés, et sont souvent proches de permis classés 2, notamment dans les périphéries d'agglomérations, zones agricoles mixtes ou également en zone de transition (pente > 10°, éloignement des lignes, mais bon ensoleillement).

Enfin, bien que la majorité des permis aient été correctement prédis par le modèle (classés en 1 ou 2), un nombre non négligeable apparaît en classe 0. Cela signifie qu'ils ont été délivrés dans des zones que le modèle considérait comme exclues, en raison de la présence d'au moins un critère jugé éliminatoire, tel qu'une occupation du sol incompatible ou une contrainte forte identifiée dans ces secteurs. La zone de discordance majeure ici est le cluster de permis classés 0 à l'est du Vaucluse (entre le Vaucluse et les Alpes-de-Haute-Provence), au niveau de Carpentras – Apt – Forcalquier. Cette classification s'explique par une occupation du sol jugée peu favorable, marquée par la prédominance de terres arables et de cultures permanentes (note 1), donc en conflit d'usage avec l'agriculture. On y trouve également des zones forestières sur les reliefs du Luberon, un accès aux réseaux moins aisés (éloignement des lignes haute tension ou des postes), des contraintes environnementales modérées à fortes (avec en moyenne 2 à 4 réglementations applicables), ainsi que des pentes parfois marquées sur les versants du massif. On note également une seconde zone de permis classés 0 dans le nord du Var, notamment en raison de la pente marquée dans cette zone, de l'éloignement aux infrastructures et d'un potentiel solaire un peu moins favorable que dans d'autres secteurs.

Mais alors, pourquoi retrouve-t-on des permis dans des zones normalement incompatibles selon le modèle multicritère ? Plusieurs hypothèses peuvent être avancées. Il pourrait s'agir de cas d'arbitrages politiques ou fonciers. Ces zones, bien que techniquement moins idéales selon les critères du modèle, peuvent avoir été retenues pour plusieurs raisons : une dynamique foncière locale favorable (communes volontaristes ou terrains disponibles), la mise en œuvre de projets agrivoltaïques non pris en compte par le modèle, ou encore une volonté de réhabiliter des sites dégradés ou de saisir des opportunités foncières ponctuelles.

On peut également penser que ces cas révèlent plusieurs limites du modèle multicritère et éclairent des logiques d'aménagement spécifiques. D'une part, ils illustrent les limites structurelles du modèle, qui reste fondé sur des critères physiques et réglementaires objectifs, sans intégrer les dynamiques d'acteurs, les volontés politiques locales ou les stratégies territoriales. Or, certaines communes rurales ou peu denses peuvent se montrer particulièrement volontaristes dans le développement des énergies renouvelables, en facilitant l'accès au foncier ou en mobilisant des outils d'aménagement adaptés. D'autre part, l'implantation de projets photovoltaïques dans des zones jugées moins favorables par le modèle peut aussi refléter une volonté d'équiper des territoires moins densément peuplés, parfois éloignés des réseaux principaux, dans une logique de rééquilibrage territorial ou d'aménagement solidaire. Ces logiques échappent à une analyse strictement technique, mais restent cohérentes avec certains objectifs politiques de transition énergétique.

Enfin, ces cas peuvent également traduire une limite méthodologique dans l'élaboration du modèle multicritère. En effet, le choix d'exclure automatiquement une zone dès qu'un seul critère atteignait un seuil jugé éliminatoire a pu conduire à disqualifier des secteurs qui, par

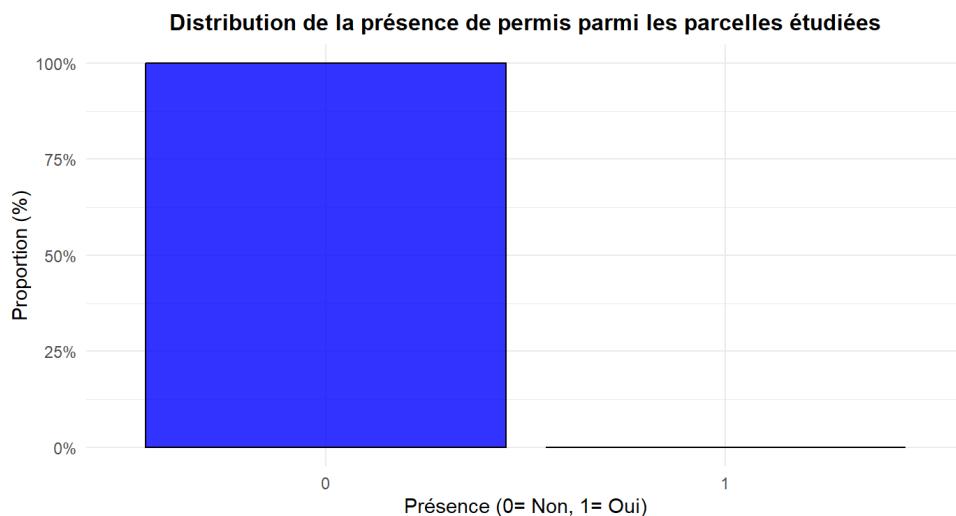
ailleurs, réunissaient des conditions très favorables sur l'ensemble des autres critères. Certains permis classés ici en catégorie 0 présentent peut-être en réalité un seul critère légèrement défavorable, tandis que le reste des paramètres était optimal. Cela interroge sur la rigidité du système de notation et suggère qu'un autre calibrage au niveau des critères aurait pu mieux refléter la réalité. De plus, certaines valeurs seuils fixées pour discriminer les classes de chaque critère peuvent également s'avérer mal calibrées, ce qui peut accentuer ces discordances.

Quoiqu'il en soit la majorité des permis restent malgré tout bien classés par le modèle de plus, maintenant que nous savons qu'il existe bien une association statistique entre les notes attribuées par la méthode multicritère et la présence d'un permis photovoltaïque sur une parcelle, nous pouvons nous intéresser plus précisément aux critères (variables explicatives) qui influencent le plus la présence ou l'absence d'un permis sur une parcelle. En effet, ces critères ayant servi à constituer les notes, si celles-ci présentent bien un lien statistique avec la présence des permis, alors ce lien existe également pour les critères individuels qui composent ces notes.

#### **4 Identification des critères déterminants pour l'obtention des permis photovoltaïques sur une parcelle : analyse par régression logistique**

##### **4.1 Caractérisation descriptive des parcelles avec permis photovoltaïque**

Le graphique de distribution des permis selon leur note moyenne obtenue par le modèle multicritère montre une forte concentration autour des notes 1 et 2, avec un pic clair pour la note 2 (*cf. graphique 7*).



Graphique 7 : Distribution de la présence de permis parmi les parcelles étudiées

Cette distribution confirme que la majorité des permis se situent dans des zones considérées comme favorables par le modèle.

Cependant, la présence non négligeable de permis en classe 0, et dans une moindre mesure en classe 1, indique que l'adéquation entre modèle et réalité n'est pas parfaite. Cela souligne

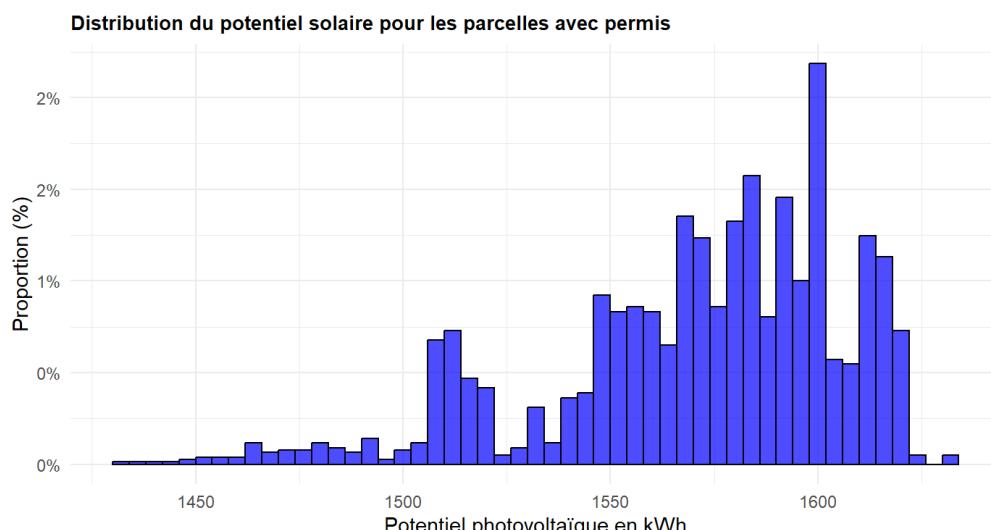
l'existence de projets réalisés dans des zones que le modèle n'identifie pas comme optimales, voire comme exclues.

Cette situation peut s'expliquer par plusieurs facteurs : limitations du modèle (pondérations absentes, rigidité des seuils, non-intégration des dynamiques locales), mais aussi réalités foncières, politiques ou économiques propres à chaque territoire.

Ainsi, si le modèle reste globalement prédictif, il ne peut totalement se substituer à une analyse contextuelle fine et à la prise en compte des stratégies d'acteurs.

Maintenant, nous allons analyser chacun des critères ayant servi à l'attribution des notes, pour les parcelles disposant d'un permis photovoltaïque au sol, afin de dresser un « portrait » de ces parcelles.

Pour ce qui est du potentiel photovoltaïque, la distribution est assez hétérogène.

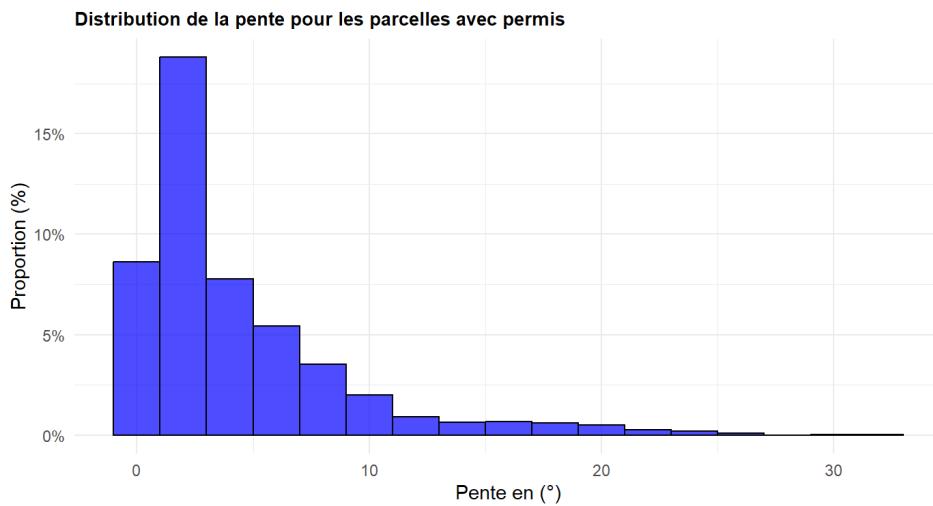


Graphique 8 : Distribution du potentiel solaire pour les parcelles avec permis

Sans surprise, on observe une légère asymétrie vers la gauche (*cf. graphique 8*), avec une accumulation entre 1550 et 1620 kWh/an, qui constitue une zone de concentration de permis. Cela suggère une préférence, chez les parcelles avec permis, pour des parcelles à fort potentiel solaire.

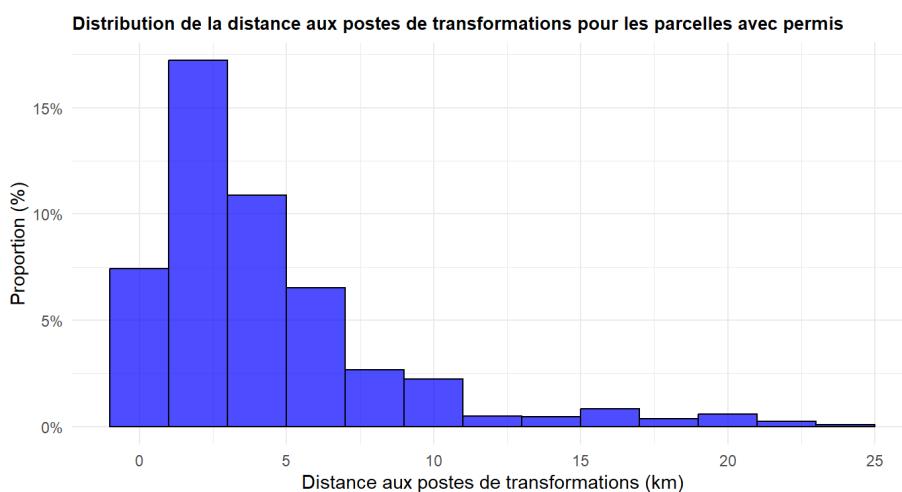
Néanmoins, on note la présence non négligeable de cas « atypiques » : des permis délivrés dans des zones à potentiel solaire plus faible (<1500).

Les développeurs semblent donc globalement privilégier les zones avec un potentiel solaire élevé, ce qui confirme la pertinence du critère dans le modèle. Cependant, la présence de permis dans des zones à plus faible potentiel montre que ce n'est pas le seul facteur décisif. Cela peut aussi s'expliquer par des facteurs non modélisés comme des subventions locales, des contraintes réglementaires assouplies ou des choix d'opportunité foncière.



Graphique 9 : Distribution de la pente pour les parcelles avec permis

Pour ce qui est du critère pente, c'est l'inverse, on y observe une asymétrie vers la droite.



Graphique 10 : Distribution de la distance aux postes électriques pour les parcelles avec permis

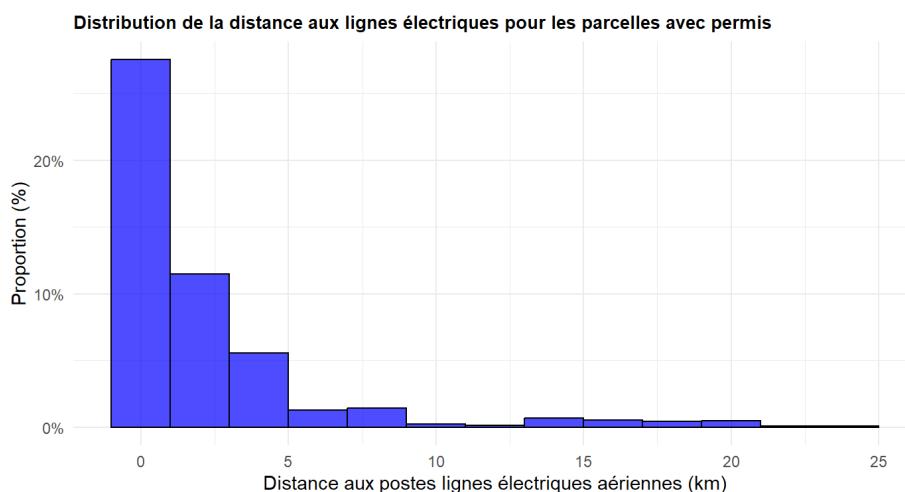
En effet, la majorité des parcelles avec un permis se situe dans une tranche inférieure à 10° de pente, avec plus de 25 % des parcelles avec permis situées entre 0 et 5° (*cf. graphique 9*). On observe notamment un pic entre 0 et 2° de pente. Après les 10° de pente, on remarque une chute de la présence de parcelles avec permis, et au-delà de 15°, cela devient exceptionnel. Cela confirme le fait que la pente est un critère technique important et restrictif dans les choix d'installation de panneaux photovoltaïques au sol : les développeurs préfèrent les terrains plats ou très légèrement inclinés. Néanmoins, bien que très rares, il existe quelques cas de parcelles avec permis situées sur des terrains à 20° ou plus de pente. Cela pourrait refléter des projets expérimentaux ou très localisés, un intérêt économique particulier, ou une orientation au sud favorable qui compense la pente.

La distribution des parcelles avec un permis, pour ce qui est de la distance aux postes de transformation électrique, est marquée par une asymétrie vers la droite (*cf. graphique 10*). La majorité des parcelles avec permis se situent à moins de 5 km d'un poste de transformation,

avec un pic clair entre 1 et 3 km, ce qui suggère une zone préférentielle à ces distances. Après 5 km, la fréquence des permis baisse nettement. Très peu de projets sont à plus de 15 km d'un poste, car l'accessibilité devient problématique à ces niveaux de distance.

Encore une fois, on note tout de même certaines parcelles avec permis situées à plus de 20 km des postes de transformation. Bien que marginales, ces parcelles existent, surtout entre 20 et 25 km de distance. Ces parcelles sont peut-être concernées par des réseaux souterrains spécifiques ou bénéficient de solutions techniques compensatoires (lignes privées, stations relais).

L'asymétrie à droite est encore plus marquée en ce qui concerne la distribution des parcelles avec permis pour le critère de distance aux lignes électriques aériennes (*cf. graphique 11*).

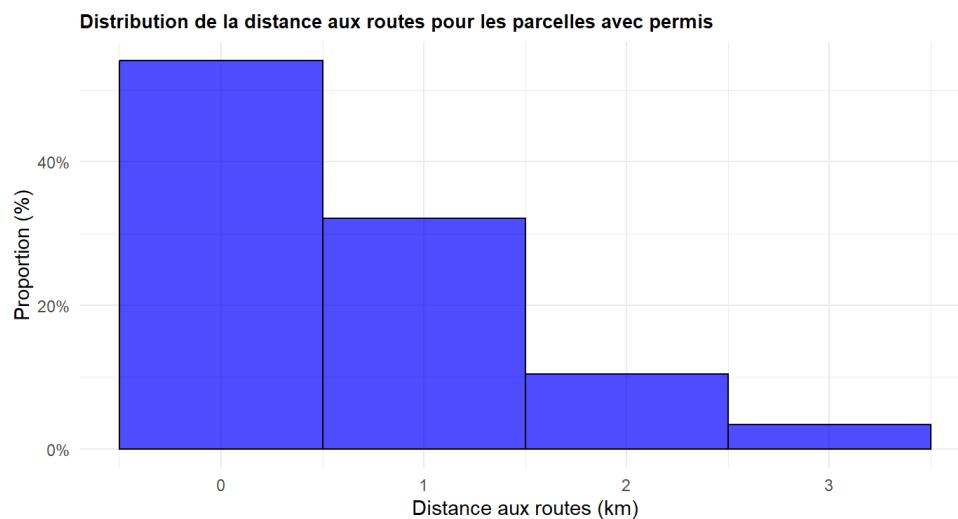


Graphique 11 : Distribution de la distance aux lignes électriques pour les parcelles avec permis

Il y a une importante concentration des parcelles avec permis à proximité immédiate des lignes : en effet, plus de 25 % sont à moins de 2 km de distance d'une ligne électrique aérienne. Cela reflète une préférence structurelle très marquée pour la proximité aux lignes électriques. À partir de 5 km, la présence de permis devient nettement plus rare, et à plus de 10 km, la fréquence chute encore davantage (proche de zéro).

Quelques permis existent jusqu'à 20–25 km, mais ce sont des exceptions, qui peuvent s'expliquer par une connexion à des lignes privées ou à des lignes haute tension spécifiques. On peut donc conjecturer que le critère de distance aux lignes aériennes est plus strict que celui de distance aux postes électriques, car la fonction même des lignes électriques aériennes est justement d'assurer le raccordement des centrales photovoltaïques vers les postes électriques. Ainsi, les centrales photovoltaïques peuvent être situées relativement loin des postes électriques, mais elles doivent impérativement être proches d'une ligne aérienne afin de pouvoir y être raccordées.

Plus de 50 % des parcelles avec permis se situent à moins de 1 km d'une route.

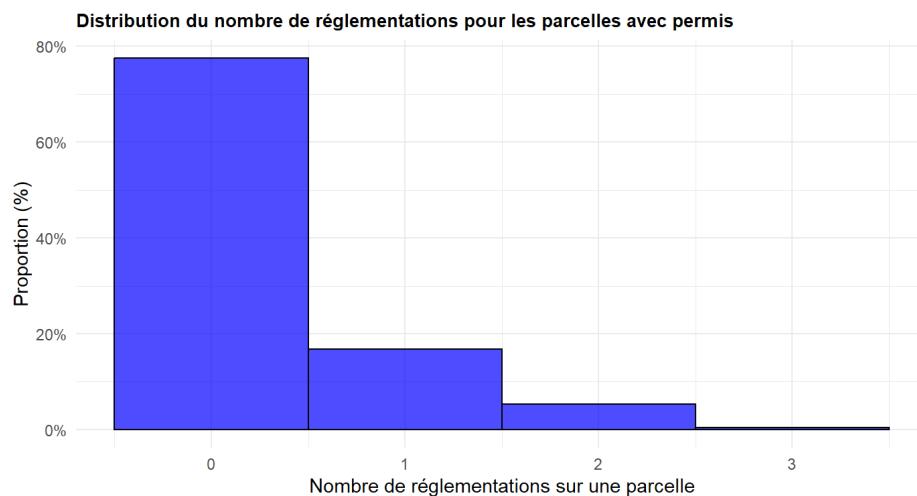


Graphique 12 : Distribution de la distance aux routes pour les parcelles avec permis

On observe donc un pic très net à proximité immédiate des axes routiers. Cela montre une préférence marquée pour les terrains faciles d'accès (*cf. graphique 12*). Ensuite, la proportion de parcelles avec un permis chute rapidement dès que l'on s'éloigne du kilomètre de distance aux routes, et à plus de 2 km, ces parcelles deviennent très rares. Il y a très peu de parcelles avec un permis à 3 km de distance d'une route.

Cela s'explique par le fait que la proximité aux routes constitue un critère logistique clé pour réduire les coûts d'infrastructures et faciliter la construction et la maintenance.

Pour les parcelles avec permis, on observe une écrasante majorité de parcelles sans réglementation environnementale : environ 78 % des parcelles avec permis n'ont aucune réglementation identifiée. Cela indique une forte préférence pour des terrains non contraints (*cf. graphique 13*).



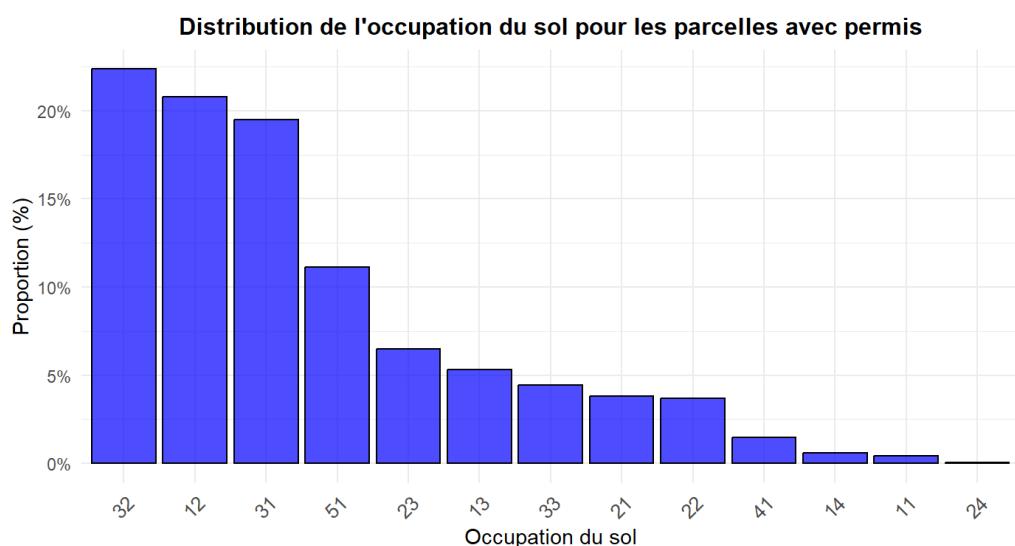
Graphique 13 : Distribution du nombre de réglementations pour les parcelles avec permis

On remarque une diminution nette avec chaque contrainte supplémentaire : moins de 20 % des permis sont délivrés sur des terrains soumis à au moins une contrainte, et seulement une infime proportion de parcelles avec permis supportent deux ou trois contraintes. Cela confirme que l'absence de contraintes réglementaires est un facteur très favorable à l'obtention d'un permis.

En région PACA, le type d'occupation du sol qui possède le plus de parcelles avec un permis photovoltaïque est celui des milieux à végétation arbustive et/ou herbacée (22 %), car il s'agit de milieux ouverts et accessibles.

<b>Code</b>	<b>Nom ocsol</b>
11	Zones urbanisees
12	Zones industrielles ou Commerciales, infrastructures et equipements
14	Espaces ouverts urbains et zones de loisirs
21	Terres arables
22	Cultures permanentes
23	Prairies
24	Zones agricoles complexes ou en mutation
31	Forêts
32	Milieux a vegetation arbustive et ou herbacee
33	Espaces ouverts, sans ou avec peu de vegetation
41	Zones humides interieures
52	Eaux maritimes
51	Eaux continentales
42	Zones humides maritimes
13	Mines, decharges et chantiers

Tableau 13 : Nomenclature de l'occupation du sol



Graphique 14 : Distribution de l'occupation du sol pour les parcelles avec permis

Ensuite, 21 % de ces parcelles sont situées dans des zones industrielles ou commerciales, ou sur des infrastructures ; ces terrains sont déjà anthroposés, donc moins conflictuels pour l'environnement, et sont généralement assez éloignés des espaces résidentiels. Les forêts présentent également une part assez importante de parcelles avec permis (19 %), ce qui peut correspondre à des projets sur des parcelles boisées dégradées ou en reconversion. Individuellement modestes, les codes 21, 22, 23, 24 (terres arables, cultures permanentes, prairies, zones agricoles complexes) reflètent une dispersion logique de projets sur différents types de surfaces agricoles, mais leur rôle global reste important (15–18 % en les cumulant). Cela suggère que les terres agricoles sont une ressource stratégique pour l'implantation de projets photovoltaïques, même si aucune d'elles ne domine seule.

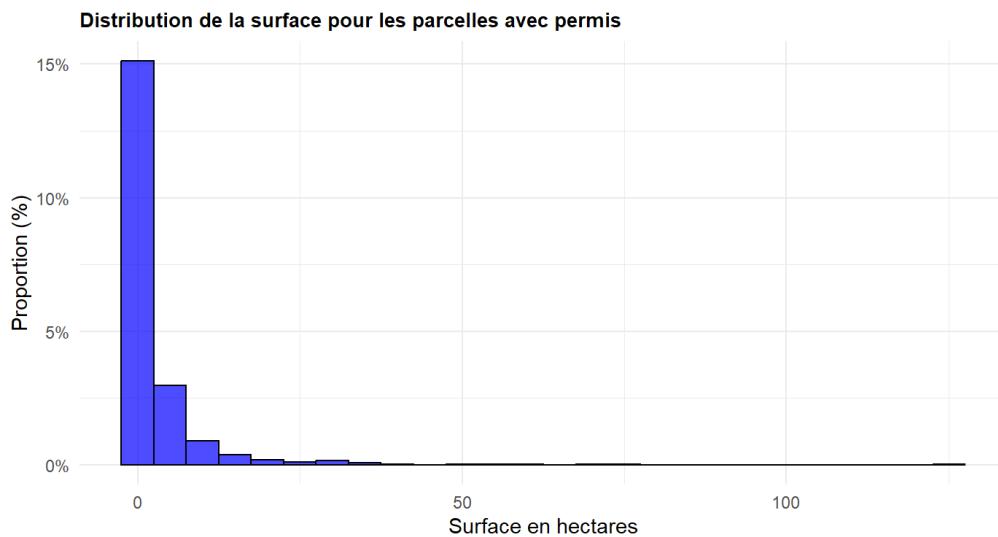
Les zones 41, 42, 52, qui correspondent aux terrains et zones humides et littorales, présentent une distribution très faible de parcelles avec permis, car ce sont souvent des zones protégées ou peu propices à l'installation de photovoltaïque au sol.

Enfin, les zones 11 et 14 (zones urbanisées et espaces ouverts urbains et zones de loisirs) possèdent le moins de parcelles avec permis, en raison du conflit d'usage que cela peut présenter.

En effet, ce sont des espaces souvent résidentiels ou réservés à d'autres usages. De plus, très souvent, les projets photovoltaïques au sol évitent de se situer trop près des zones résidentielles. Cela confirme que nous avons bien fait de noter les zones résidentielles « 0 » dans l'analyse multicritère (*cf. tableau 13 et graphique 14*).

Enfin, un critère qui n'a pas servi pour l'analyse multicritère a été ici ajouté pour la régression logistique : il s'agit de la surface des parcelles.

En ce qui concerne la surface des parcelles principalement utilisées pour des permis photovoltaïques au sol, on constate une asymétrie à droite (*cf. graphique 15*).



Graphique 15 : Distribution de la surface pour les parcelles avec permis

En effet, la grande majorité des parcelles avec un permis sont des parcelles faisant moins de 10 hectares (plutôt des petites parcelles).

Cependant, on observe une queue longue à droite, ce qui signifie qu'il existe quelques parcelles de grande surface (jusqu'à plus de 100 ha), mais elles sont très rares. Les projets photovoltaïques avec permis sont majoritairement développés sur de petites parcelles (souvent < 5 ha), ce qui est cohérent avec les pratiques d'implantation : moins de conflits d'usage, moins de contraintes foncières et administratives, et une intégration au territoire ainsi qu'un raccordement plus facile.

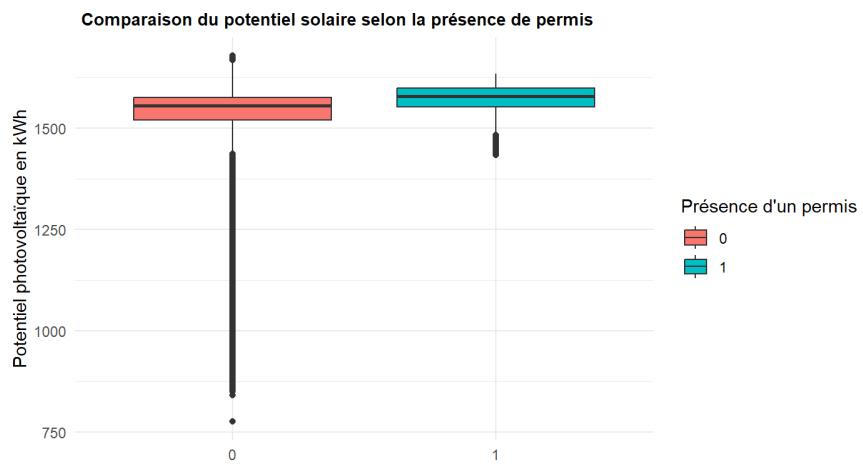
Néanmoins, il est important de noter qu'un permis photovoltaïque peut être présent sur plusieurs parcelles, ce qui signifie que la surface réelle d'un projet peut être répartie sur plusieurs unités cadastrales. Ainsi, certaines parcelles de petite taille apparente peuvent en réalité faire partie d'un ensemble plus vaste, ce qui atténue partiellement la dominance visuelle des petites surfaces dans la distribution.

La répartition des parcelles ayant obtenu un permis en PACA, selon les critères techniques et spatiaux retenus, fait apparaître des profils relativement homogènes. Elles sont majoritairement bien exposées au soleil, faiblement pentues, proches des lignes aériennes et des routes, et de taille modeste. Ces profils reflètent une logique d'optimisation des coûts et des contraintes : accès facilité, raccordement simplifié, moindres conflits d'usage. L'occupation du sol montre une préférence pour des terrains ouverts (friches, milieux herbacés) ou déjà anthropisés, traduisant une volonté d'éviter les conflits fonciers et environnementaux. Quelques cas atypiques subsistent (fortes pentes, faible ensoleillement, grandes distances), souvent liés à des configurations techniques particulières ou à des opportunités foncières locales.

#### **4.2 Comparaison des critères selon la présence ou absence de permis**

Après avoir dressé un premier portrait des parcelles avec permis à travers l'analyse de la distribution individuelle de chaque critère, il est désormais pertinent d'élargir la comparaison en confrontant ces parcelles à celles n'ayant pas obtenu de permis. Cette mise en perspective permettra de repérer plus finement les variables qui distinguent réellement les deux groupes, et ainsi d'identifier visuellement les critères les plus discriminants avant d'en approfondir l'analyse statistique.

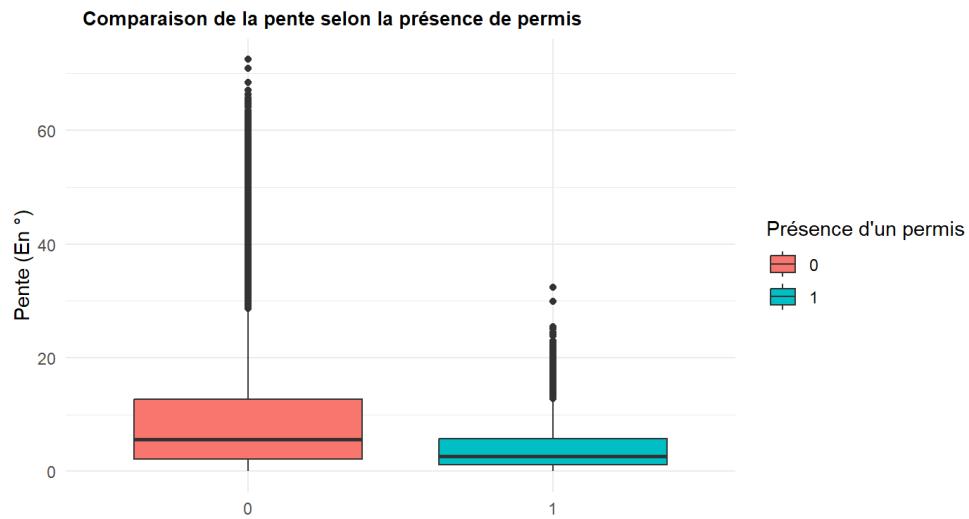
Il y a clairement une différence entre les deux groupes pour ce qui est du potentiel solaire (*cf. graphique 16*).



Graphique 16 : Comparaison du potentiel solaire selon la présence de permis

Les parcelles ayant obtenu un permis sont plus souvent localisées dans des zones à fort potentiel solaire, et présentent une distribution plus resserrée et homogène, traduisant un profil énergétique plus favorable et plus cohérent. Au contraire les parcelles sans permis sont plus dispersées et incluent une part non négligeable de zones à faible potentiel, ce qui peut expliquer l'absence de projets sur ces terrains avec des valeurs minimales du potentiel solaire. Pour ce qui est des parcelles sans permis, elles descendent en dessous de 1000 kWh/m<sup>2</sup>, ce qui est inexistant chez les parcelles avec permis. Il faut noter que les parcelles sans permis constituent la grande majorité des parcelles de ce jeu de données et qu'elles correspondent à des parcelles de tous types ce qui est donc normal.

On remarque une relation négative claire entre la pente du terrain et la probabilité d'obtention d'un permis (*cf. graphique 17*).



Graphique 17 : Comparaison de la pente selon la présence de permis

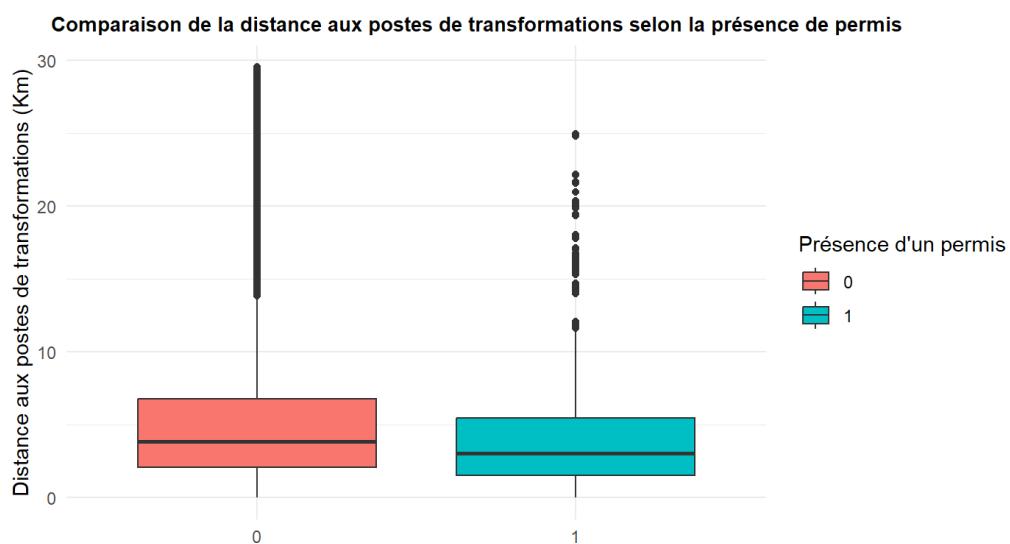
Les parcelles ayant obtenu un permis présentent quasi systématiquement des pentes faibles, tandis que les pentes plus fortes, bien que présentes dans le territoire, ne conduisent presque jamais à une autorisation.

Plus précisément, la médiane des parcelles avec permis est autour de 3° (graphique), et l'essentiel des valeurs se situe entre 1° et 6°, avec très peu de parcelles au-delà de 15° (*cf. graphique 17*). À l'inverse, les parcelles sans permis présentent une médiane bien plus élevée, proche de 7°, et une dispersion nettement plus large. Leurs valeurs extrêmes atteignent jusqu'à plus de 65°, avec un nombre important d'outliers dépassant 30°.

Cette comparaison montre que les projets autorisés se concentrent dans une fenêtre étroite de pentes faibles, ce qui reflète les contraintes techniques et économiques liées à l'installation de panneaux solaires au sol, tandis que les pentes plus élevées semblent constituer un frein majeur à l'obtention d'un permis.

Pour le critère de distance aux postes électriques de transformations il y'a une différence notable entre les deux groupes de parcelles (avec et sans permis), bien que moins marquée que pour la pente ou le potentiel solaire.

Les parcelles avec permis sont globalement plus proches des postes de transformation : leur médiane se situe autour de 3 km, avec la majorité des observations comprises entre 1 et 6 km. Les valeurs extrêmes dépassent 20 km, mais ces cas restent rares. (*cf. graphique 18*)

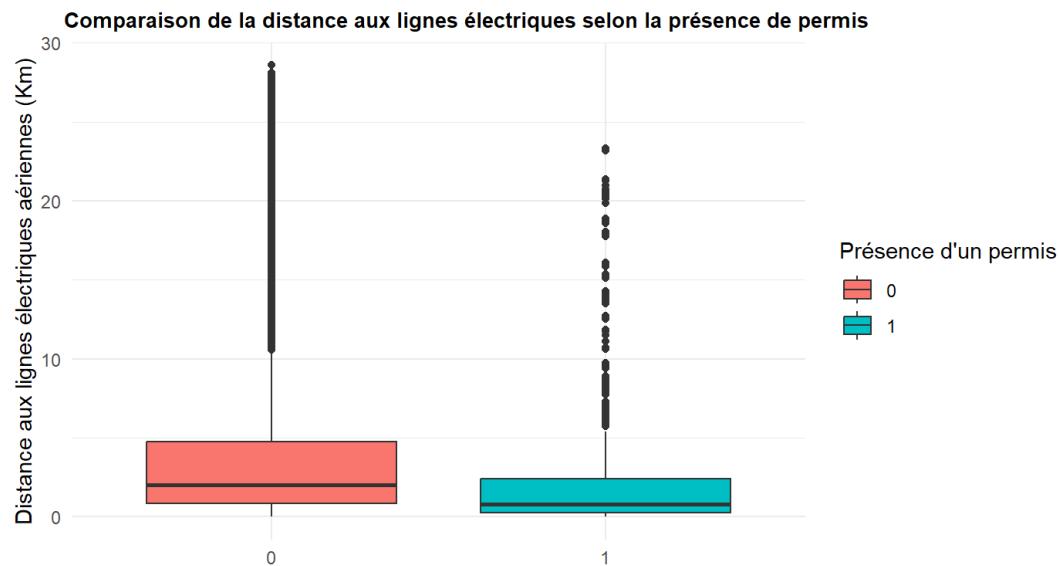


Graphique 18 : Comparaison de la distance aux postes électriques selon la présence de permis

À l'inverse, les parcelles sans permis présentent une médiane légèrement plus élevée, autour de 4 km, et une variabilité plus importante, avec des distances allant jusqu'à près de 30 km. On observe aussi un plus grand nombre d'outliers très éloignés.

Cette distribution suggère que la proximité aux postes de transformation peut favoriser l'obtention d'un permis, probablement en lien avec la réduction des coûts de raccordement au réseau. Toutefois, cette variable n'est pas discriminante à elle seule, car il existe aussi des permis délivrés à des distances modérées ou élevées. Cela indique que d'autres facteurs compensatoires peuvent intervenir dans la décision d'autorisation.

La boxplot met en évidence une différence claire entre les deux groupes de parcelles (avec et sans permis), plus marquée que la distance aux postes (*cf. graphique 19*).



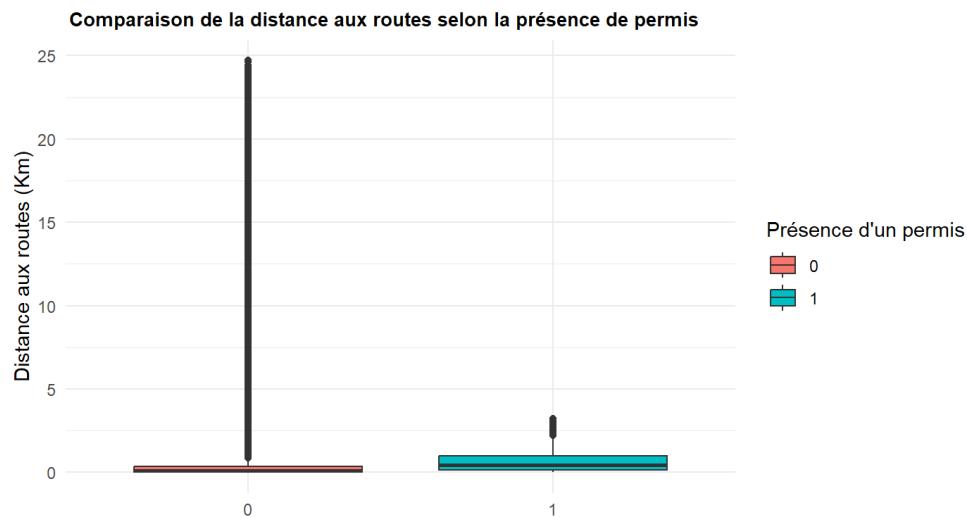
Graphique 19 : Comparaison de la distance aux lignes électriques selon la présence de permis

Les parcelles avec permis sont globalement plus proches des lignes électriques aériennes : leur médiane est très basse, autour de 0,8 km, avec la majorité des valeurs comprises entre 0 et 2,5 km. Les valeurs extrêmes dépassent 20 km, mais elles restent marginales. (*cf. graphique 19*)

À l'inverse, les parcelles sans permis présentent une médiane plus élevée, autour de 2 km, et une variabilité bien plus importante, avec des distances atteignant près de 30 km. Le nombre d'outliers très éloignés est également plus conséquent dans ce groupe.

Cette distribution suggère que la proximité immédiate aux lignes électriques est un facteur fortement favorable à l'obtention d'un permis, probablement parce qu'elle facilite le raccordement au réseau de transport d'électricité, ce qui constitue un enjeu technique et économique majeur pour les projets photovoltaïques. Toutefois, comme pour d'autres critères, cette variable n'est pas exclusive, puisque des permis ont également été délivrés sur des parcelles à plus grande distance, bien que moins fréquemment. Cela confirme ce que nous avions analysé à ce propos sur la distribution des parcelles avec permis pour ce même critère. Notamment sur le fait qu'il s'agit d'un critère plus strict que celui de la distance aux postes électriques.

Pour finir avec le critère de distance aux infrastructures, on remarque une différence entre les parcelles avec et sans permis. Les parcelles avec permis (1) sont globalement plus proches des routes, avec une médiane située autour de 0,6 km (*cf. graphique 20*).



Graphique 20 : Comparaison de la distance aux routes selon la présence de permis

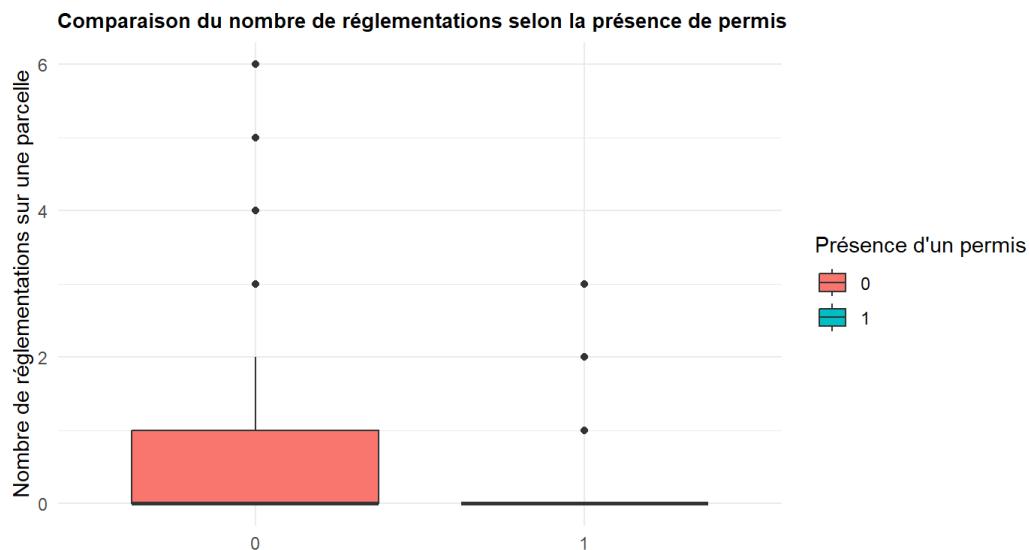
La majorité de ces parcelles se trouvent dans un intervalle relativement restreint, suggérant une forte concentration près des axes routiers. On observe également quelques valeurs extrêmes, mais celles-ci restent marginales.

En revanche, les parcelles sans permis (0) présentent une médiane plus basse (environ 0,3 km), ce qui n'est pas très différent de celle des parcelles avec permis, mais une variabilité beaucoup plus importante. Les distances s'étendent jusqu'à près de 25 km, ce qui génère une longue traîne à droite. Ce groupe comprend donc un nombre conséquent d'outliers très éloignés des routes, ce qui n'est pas le cas dans le groupe des permis délivrés.

Cette comparaison suggère que la proximité aux routes est un critère potentiellement favorable à l'obtention d'un permis, probablement pour des raisons d'accessibilité logistique et d'aménagement.

Toutefois, le fait que des parcelles proches de routes soient aussi nombreuses sans permis indique que cette proximité n'est pas suffisante en soi, et qu'elle doit être considérée en interaction avec d'autres critères (comme l'occupation du sol, la réglementation locale, la distance aux autres infrastructures, etc.).

Le critère du nombre de réglementations met en lumière une opposition nette entre les parcelles avec et sans permis. Pour ce qui est des parcelles avec un permis, elles ne sont quasiment jamais soumises à des réglementations.



Graphique 21 : Comparaison du nombre de réglementation selon la présence de permis

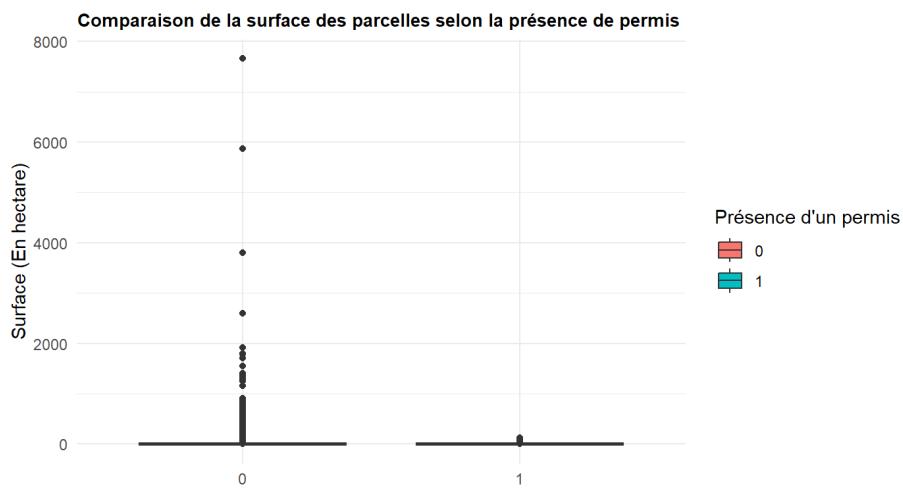
La médiane est à 0, et l'étendue des valeurs est très restreinte, allant uniquement de 0 à 3, avec très peu d'outliers (*cf. graphique 21*). Cela suggère que la quasi-totalité des permis délivrés concernent des parcelles sans contrainte réglementaire majeure, ce qui semble être un critère éliminatoire (quand on analyse ce critère seul).

En revanche, les parcelles sans permis montrent une plus grande variabilité : la médiane est toujours à 0, mais le 3e quartile s'élève à 1 réglementation, et certains cas extrêmes atteignent jusqu'à 6 réglementations. Cela indique que la présence de contraintes réglementaires, même limitées, peut freiner l'attribution des permis.

Ainsi, la présence de contraintes réglementaires est fortement dissuasive pour l'octroi de permis photovoltaïques lorsqu'on analyse ce critère seul. Bien qu'il existe quelques cas où des parcelles réglementées obtiennent un permis, ils restent exceptionnels, ce qui traduit une tolérance très faible à l'égard de ces contraintes dans le processus de sélection.

Cela confirme l'importance d'un cadre foncier clair et non constraint pour favoriser le développement de projets photovoltaïques au sol.

Il y a une répartition sensiblement différente des surfaces entre les parcelles ayant obtenu un permis et celles sans autorisation. Bien que la médiane des deux groupes soit relativement similaire (*cf. graphique 22*), autour de 2 hectares, la dispersion est beaucoup plus marquée parmi les parcelles sans permis.

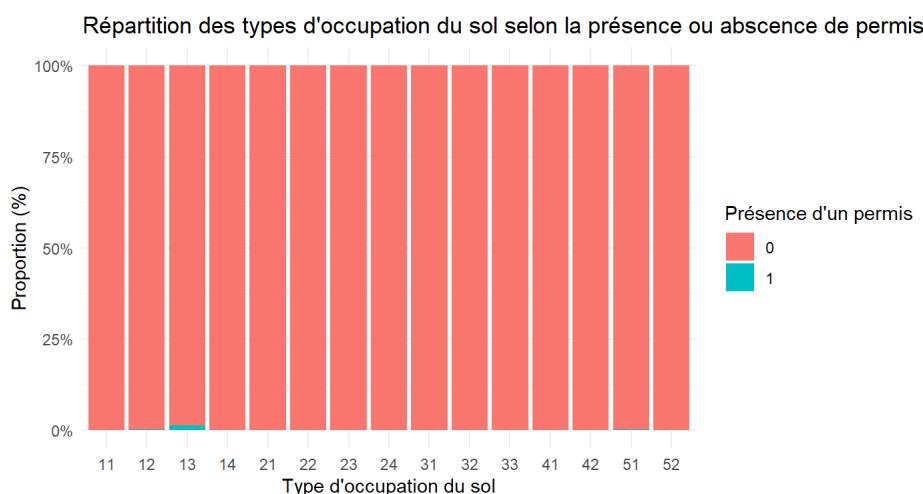


Graphique 22 : Comparaison de la surface des parcelles selon la présence de permis

Les parcelles autorisées présentent une distribution resserrée, concentrée autour de petites et moyennes surfaces, majoritairement inférieures à 5 hectares. À l'inverse, les parcelles non autorisées affichent une variabilité extrême, avec de nombreux *outliers* très importants, certains dépassant 8 000 hectares. Ces très grandes surfaces, bien que rares, sont quasi absentes du groupe des parcelles avec permis.

Cette différence suggère que les très grandes surfaces sont moins susceptibles de recevoir un permis, probablement en raison de freins réglementaires, d'enjeux d'aménagement ou de conflits d'usage. Elle souligne également que les projets photovoltaïques autorisés tendent à cibler des surfaces de taille modérée, probablement plus compatibles avec les exigences locales et les critères d'évaluation des projets.

Enfin le graphique empilé ci-dessous illustre la répartition des types d'occupation du sol (OCSOL) en fonction de la présence ou de l'absence de permis photovoltaïque.



Graphique 23 : Répartition des types d'occupation du sol selon la présence de permis

Il est important de noter encore une fois qu'il existe un fort déséquilibre dans les effectifs, on compte environ 4 939 144 parcelles sans permis contre seulement 1 923 parcelles avec un permis pour une installation photovoltaïque au sol. Ce déséquilibre est attendu, car l'étude porte sur l'ensemble des parcelles cadastrales de la région, dont la majorité ne sont pas concernées par un projet photovoltaïque. En effet, l'usage photovoltaïque constitue encore aujourd'hui un usage du sol relativement marginal, comparé à d'autres usages agricoles, forestiers, urbains, etc.

Ce déséquilibre massif rend l'interprétation directe des proportions sur ce type de graphique difficile, car les parcelles avec permis apparaissent visuellement quasi-inexistantes pour la plupart des catégories d'occupation du sol. Néanmoins, une lecture attentive permet de repérer une exception notable : la catégorie OCSOL 13, correspondant aux « Mines, décharges et chantiers », affiche une proportion visible de parcelles avec permis, contrairement à la quasi-totalité des autres catégories.

Ce constat suggère que, malgré leur rareté dans le paysage global, ces terrains présentent des caractéristiques particulièrement propices ou attractives pour le développement de projets photovoltaïques au sol. Cela peut s'expliquer par le fait que ces zones sont souvent considérées comme dégradées ou non valorisées, et donc compatibles avec une reconversion en production énergétique, dans une logique d'« évitemen» des conflits d'usage. Ainsi bien que ce graphique soit biaisé par le fort déséquilibre entre les deux populations de parcelles, il met tout de même en lumière une sur-représentation relative des permis dans les anciennes zones industrielles ou dégradées

Les analyses descriptives menées à partir des différents critères confirment que l'implantation de projets photovoltaïques au sol en région PACA repose sur des configurations relativement cohérentes. Si chaque critère pris isolément (comme la pente, la surface, les distances aux infrastructures ou encore l'occupation du sol) permet d'esquisser des tendances claires, l'interprétation reste partielle, ces facteurs n'agissent pas indépendamment les uns des autres.

En effet, une parcelle faiblement pentue mais très éloignée du réseau peut, par exemple, compenser ce désavantage par d'autres atouts techniques ou fonciers. De même, la préférence apparente pour certains types d'occupation du sol (comme les friches ou terrains anthropisés) pourrait être influencée par leur accessibilité ou leur statut réglementaire.

C'est pourquoi il devient nécessaire d'aller au-delà de cette approche univariée. La suite de l'analyse mobilise un modèle de régression logistique qui permettra d'apprécier la contribution relative de chaque critère en contrôlant simultanément les autres. Ce changement d'échelle analytique nous offrira une vision plus fine et robuste des facteurs qui favorisent réellement l'obtention d'un permis, en isolant les effets propres de chaque variable dans un cadre multivarié.

#### **4.3 L'apport d'un modèle logistique pour l'analyse des facteurs influençant la présence de permis photovoltaïque au sol dans la région PACA**

##### ***Évaluation globale du modèle***

La régression logistique a été retenue pour son aptitude à modéliser une variable binaire, en l'occurrence la présence ou l'absence de permis sur une parcelle. Contrairement à d'autres méthodes statistiques (comme la régression linéaire classique ou les analyses purement descriptives), elle permet d'estimer la probabilité d'occurrence d'un événement en fonction de plusieurs variables explicatives, tout en prenant en compte les effets combinés de celles-ci. Son intérêt réside également dans la possibilité d'interpréter les résultats à travers les **odds ratios**, facilitant ainsi la lecture des facteurs qui augmentent ou réduisent la probabilité d'implantation. Dans ce cadre, plusieurs modèles ont été testés, avec des combinaisons de variables et d'hypothèses différentes, afin de renforcer la robustesse de l'analyse et d'identifier les déterminants les plus significatifs.

1. Il y'a donc le modèle de base qui inclue donc toutes les variables explicatives disponibles sans rien changer et qui pour objectif de servir de point de référence pour les autres modèles.
2. Après il y'a le modèle avec pondération qui est identique au modèle de base en termes de variables prise en compte mais avec une pondération ajoutée pour corriger le fort déséquilibre entre classes (beaucoup plus de 0 que de 1), cela a pour objectif d'améliorer la capacité du modèle prédire les cas minoritaires (avec permis).
3. Ensuite il y'a le modèle réduit où on supprime les variables « nombre de réglementations » et « surface des parcelles » car l'influence de la variable «« nombre de réglementations » est parfois faible dans le modèle global et la variable « surface des parcelles » est plutôt corrélé à l'occupation du sol. Cela a pour objectif d'avoir un modèle plus simple avec moins de variable afin de conserver un bon pouvoir explicatif.
4. Enfin un modèle avec interaction a été testé en ajoutant notamment une interaction entre les variables « potentiel solaire » et de « pente » avec comme hypothèse que l'effet du potentiel solaire pourrait dépendre de l'inclinaison du terrain. Ainsi cela permet de voir si des effets croisés améliorent le modèle.

Leur performance relative a été comparée à l'aide du critère d'information d'Akaike (AIC), une mesure standard permettant d'arbitrer entre modèles selon un compromis entre qualité d'ajustement et complexité. Le modèle avec l'AIC le plus faible est le modèle de base avec un AIC de 28389.72 (*cf. tableau 14*).

<b>Modèle</b>	<b>AIC</b>
Modèle de base	28389.72
Modèle pondéré	195591.88
Modèle réduit	28610.37
Modèle avec interaction	28390.16

Tableau 14 : Résultats et AIC issus des tests des différents modèles

Ce serait donc le modèle le plus parcimonieux et informatif parmi ceux évalués. Au contraire le modèle pondéré affiche l'AIC le plus élevé (195591.88), et de loin. Cela signifie que ce modèle explique le moins bien les données, malgré la tentative de correction du déséquilibre.

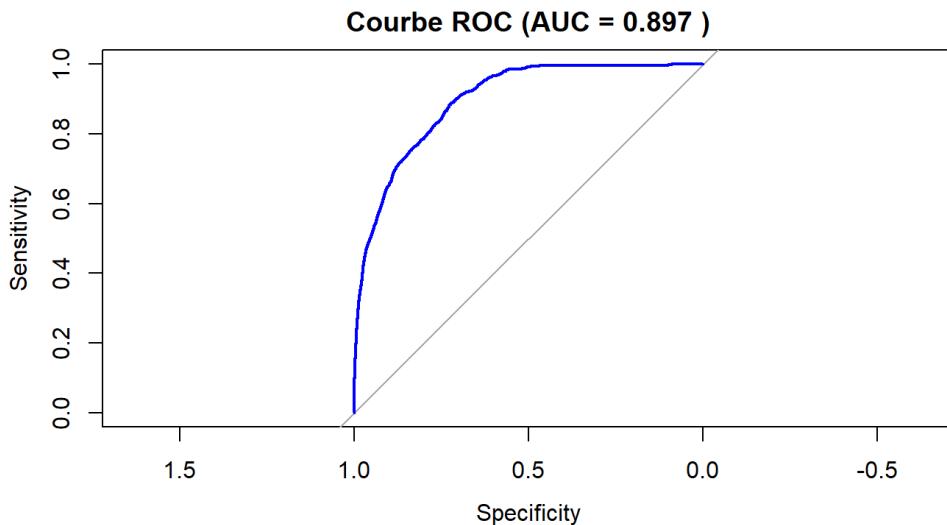
Cette contre-performance peut s'expliquer par le fait que la pondération amplifie fortement le poids de très rares cas positifs, ce qui perturbe l'estimation des coefficients et déstabilise l'ensemble du modèle. En d'autres termes, le modèle pondéré cherche à trop forcer la prédiction des cas minoritaires, au détriment de l'ajustement global. Ainsi, bien que la pondération soit une stratégie légitime en cas de déséquilibre, elle n'améliore pas ici la qualité du modèle. Le modèle de base, plus équilibré dans sa formulation, reste donc le plus pertinent pour l'interprétation et la prédiction.

Pour les autres modèles, les AIC sont relativement proche de celui du modèle qui a l'AIC le plus faible. Cela suggère que, bien qu'ils diffèrent légèrement par la structure (suppression de variables ou ajout d'interactions), ces modèles offrent un niveau d'ajustement global comparable. Autrement dit, la réduction du nombre de variables ou l'introduction d'interactions n'améliore pas significativement la qualité explicative du modèle, mais ne la dégrade pas non plus de manière substantielle. Cela renforce l'idée que le modèle de base représente un bon compromis entre précision, stabilité et lisibilité, et qu'il constitue une base solide pour l'interprétation des résultats.

En complément de l'AIC, le pseudo-R<sup>2</sup> de McFadden a été calculé afin d'estimer la qualité globale de l'ajustement du modèle. Celui-ci s'élève à 0.144, ce qui, bien que modeste en valeur absolue, est considéré comme un ajustement acceptable pour un modèle logistique sur des données réelles avec un fort déséquilibre de classes. Mais cela indique notamment que le modèle est significativement meilleur que le modèle nul, mais que les variables explicatives considérées dans l'analyse ne permettent pas à elles seules d'expliquer complètement la distribution des permis parmi les parcelles et que d'autres facteurs doivent également être pris en compte.

Le critère d'Akaike (AIC) a donc permis d'identifier le modèle le plus parcimonieux et statistiquement performant, (ici le modèle de base), mais il ne renseigne pas directement sur la capacité du modèle à distinguer correctement les parcelles avec permis de celles sans permis. Ainsi pour évaluer cette capacité discriminante, une analyse de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) est réalisé. Cette courbe permet d'apprécier dans quelle mesure le modèle est capable de classer efficacement les observations, en mesurant la sensibilité et la spécificité sur l'ensemble des seuils de classification possibles.

En ce qui concerne la courbe ROC (*cf. graphique 24*) la courbe bleue s'écarte nettement de la diagonale grise (laquelle représente un modèle aléatoire, sans pouvoir discriminant).



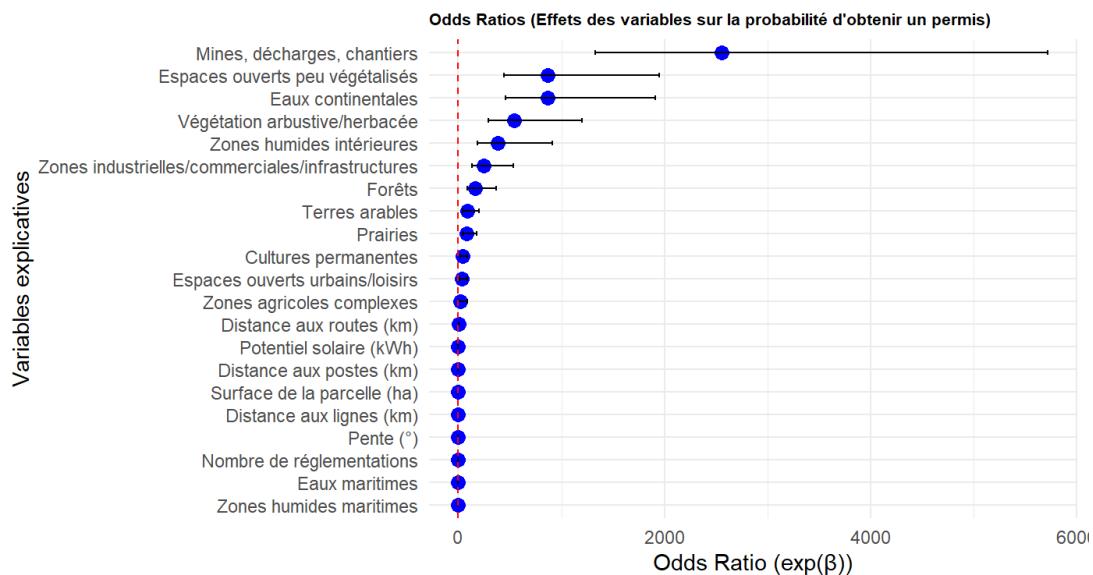
Graphique 24 : Courbe ROC du modèle retenu

Cela indique que le modèle possède une capacité de discrimination réelle entre les parcelles avec et sans permis. L'AUC est de 0.897, ce qui est très élevé ici, avec 0.897, le modèle peut correctement distinguer dans environ 90 % des cas une parcelle avec permis d'une sans permis. Ce résultat confirme que le modèle de base sélectionné est statistiquement robuste pour classer les parcelles selon leur probabilité d'obtenir un permis. Il valide donc la pertinence des variables explicatives choisies, même dans un contexte déséquilibré où très peu de parcelles disposent d'un permis.

La courbe ROC a permis d'évaluer la performance prédictive globale du modèle, avec une capacité de discrimination jugée excellente (AUC = 0.897). Toutefois, si ce résultat témoigne de l'efficacité du modèle à distinguer les parcelles avec ou sans permis, il ne nous renseigne pas encore sur les facteurs qui influencent cette probabilité.

### ***Résultats de la régression logistique appliquée sur le modèle 1***

Pour cela, l'analyse des coefficients estimés, et plus précisément des odds ratios, s'avère essentielle. Elle permet d'interpréter la contribution individuelle de chaque variable explicative, en identifiant celles qui augmentent ou réduisent significativement les chances d'obtenir un permis. C'est ce que nous allons examiner à présent.



Graphique 25 : Odds ratios

Lorsqu'on fait l'analyse des odd ratio de toutes les variables explicatives en même temps on constate un phénomène central, la variable occupation du sol est de très loin la plus déterminante dans la probabilité d'obtenir ou non un permis photovoltaïque au sol sur une parcelle. C'est cette variable ainsi que toutes les composantes de cette variable qui présente les effets les plus marqués que ce soit en valeur absolue avec des odd ratios très élevés (*cf. graphique 25*) qu'en significativité statistique.

Donc certains types de sols sont massivement associés à une forte probabilité d'obtention de permis. Comme les Mines, décharges et chantiers avec un odd ratio extrêmement élevé (supérieur à 2500) ce qui traduit une très forte surreprésentation de permis sur ce type de parcelle. Cette surreprésentation se confirme visuellement dans le graphique de répartition (*cf. graphique 23*) bien que le nombre total de parcelles sans permis soit immensément supérieur à celui des parcelles avec permis (près de 5 millions contre moins de 2 000), les parcelles classées comme "Mines, décharges, chantiers" apparaissent majoritairement dans la catégorie avec permis.

Autrement dit, les parcelles sans permis couvrent un large éventail d'usages potentiels, elles peuvent être destinées à l'accueil de futurs équipements publics, à des projets commerciaux, résidentiels, ou encore à la préservation environnementale. Le photovoltaïque au sol ne représente qu'un usage parmi de nombreux autres, ce qui explique le déséquilibre très marqué entre le nombre de parcelles sans permis et celles avec un permis.

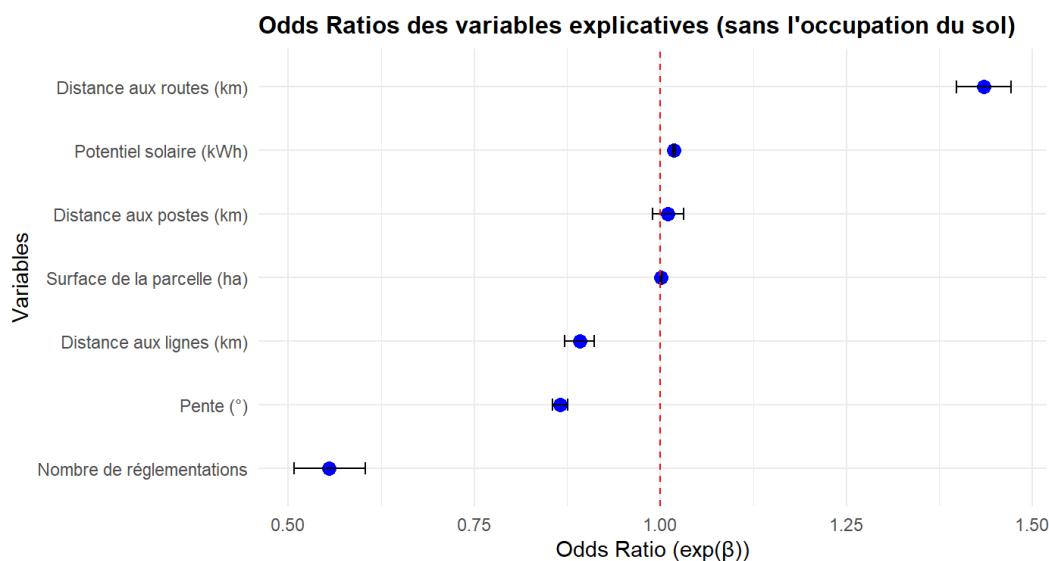
Malgré cette forte disparité, on observe que les parcelles ayant un permis photovoltaïque sont particulièrement concentrées dans la catégorie d'occupation du sol « Mines, décharges et chantiers ». Cela témoigne d'une préférence marquée pour ce type de terrain dans le cadre des projets solaires, probablement en raison de leur faible valeur foncière et de l'absence d'usages concurrents.

Cela renforce l'idée que ce type de sol constitue une cible stratégique privilégiée par les porteurs de projet, ces terrains sont souvent peu valorisés économiquement, dépourvus d'usages

concurrents, et donc plus aisément mobilisables pour des installations solaires. Cette attractivité se traduit à la fois par une fréquence d'apparition marquée dans les permis délivrés et par un effet statistique majeur dans la modélisation. Ensuite on note que les espaces ouverts peu végétalisés et milieux arbustifs/herbacés également associés à des odds ratios très élevés, indiquant que ces terrains ouverts et peu contraints sont très propices à l'implantation de photovoltaïque au sol. Enfin on remarque les eaux continentales qui est un résultat surprenant, mais qui peut s'expliquer par la présence de projets flottants ou d'incohérences ponctuelles dans la base de données de base.

D'autres types d'occupation du sol montrent des effets positifs significatifs mais plus modérés comme les zones industrielles ou commerciales, les forêts, prairies, ou encore terres arables, qui présentent des odds ratios entre 2 et 5. Ces valeurs indiquent qu'elles sont favorables, mais moins systématiquement utilisées que les friches ou espaces délaissés. À l'inverse, certains types d'occupation du sol semblent incompatibles ou peu attractifs pour des projets photovoltaïques comme les zones humides maritimes et eaux maritimes qui affichent des odds ratios très faibles, proches de zéro et sans significativité. Cela traduit une absence quasi totale de permis sur ces zones sensibles ou protégées.

Ces résultats illustrent à quel point la nature du sol (type d'occupation du sol) est un facteur décisif dans l'implantation des projets photovoltaïques au sol. Les développeurs ciblent clairement des terrains peu valorisés, peu conflictuels, où la transformation foncière est plus acceptable (friches, espaces dégradés). À l'inverse, les espaces à forte valeur écologique ou soumis à des contraintes d'usage (zones humides, maritimes) sont quasiment exclus. Si ces effets sont dominants, ils peuvent éclipser l'impact des autres variables. C'est pourquoi il est pertinent, dans un second temps, d'isoler ces autres facteurs en visualisant les odds ratios sans la variable occupation du sol, pour mieux interpréter leurs poids respectifs.



Graphique 26 : Odds ratios sans l'occupation du sol

L'analyse des odds ratios, en excluant l'occupation du sol, permet d'évaluer plus finement l'effet propre de chaque variable continue sur la probabilité d'obtention d'un permis.

La distance aux routes apparaît comme la variable la plus fortement associée à une augmentation de cette probabilité : son odds ratio est largement supérieur à 1 (environ 1,45), ce qui signifie que plus une parcelle est éloignée d'une route, plus elle a statistiquement de chances d'obtenir un permis. Ce résultat peut sembler contre-intuitif, mais il peut s'expliquer par le fait que les projets photovoltaïques au sol sont souvent implantés en dehors des zones très accessibles, afin d'éviter les conflits d'usage ou les zones urbanisées. De plus cela permet de mettre en lumière un écart d'interprétation entre l'analyse descriptive et l'analyse multivariée. D'un côté, la distribution univariée montrait que la majorité des projets autorisés se situaient à proximité immédiate des routes (*cf. graphique 12*) ce qui semble indiquer que la proximité favorise l'obtention d'un permis. Toutefois, dans la régression logistique, l'odds ratio associé à la distance aux routes est supérieur à 1, indiquant qu'à caractéristiques égales par ailleurs, les parcelles plus éloignées des routes présentent une probabilité légèrement plus élevée d'obtenir un permis. (*cf. graphique 26*)

Ce paradoxe apparent s'explique par la différence de logique entre les deux approches : l'analyse descriptive ne considère que les parcelles avec permis, sans comparaison avec celles qui n'en ont pas. À l'inverse, le modèle logistique compare les deux groupes et isole les effets propres de chaque variable, en tenant compte de l'ensemble des autres critères (pente, occupation du sol, surface, etc.). Il est donc possible que les parcelles proches des routes soient également soumises à des contraintes réglementaires ou à un usage concurrent (urbain, agricole, etc.), réduisant au final leur probabilité d'accueillir un projet photovoltaïque. Ce cas souligne l'intérêt de combiner les approches descriptives et statistiques pour éviter les interprétations trompeuses.

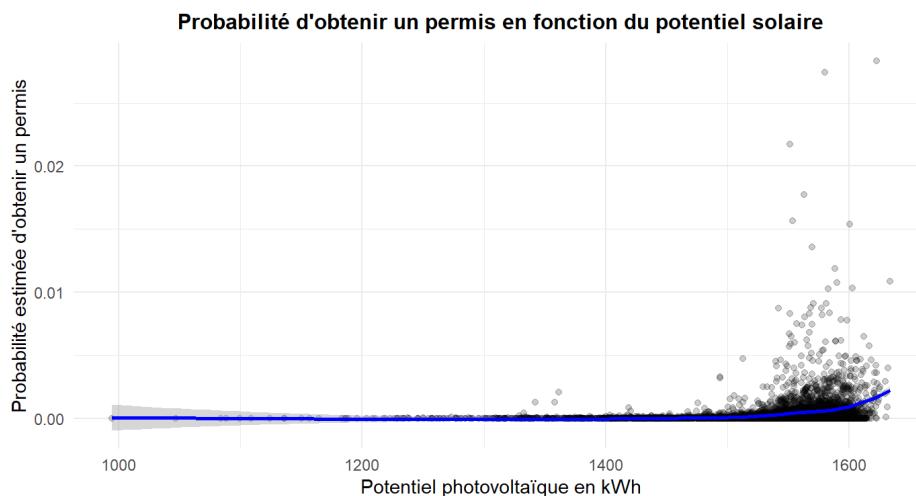
Ensuite, plusieurs variables ont un effet négatif sur la probabilité d'autorisation. C'est notamment le cas du nombre de réglementations (odds ratio bien inférieur à 1), ce qui indique qu'à chaque réglementation supplémentaire, les chances d'obtention d'un permis diminuent significativement. Cela traduit l'effet restrictif des contraintes juridiques ou environnementales pesant sur les parcelles. De même, la pente et la distance aux lignes électriques ont des effets défavorables : plus une parcelle est pentue ou éloignée d'une ligne aérienne, plus la probabilité d'obtention d'un permis diminue, ce qui est cohérent avec les exigences techniques de développement. D'autres variables ont un effet plus modéré mais néanmoins significatif, comme le potentiel solaire, dont l'odds ratio légèrement supérieur à 1 confirme qu'une meilleure ressource énergétique favorise les projets, ou la surface, qui a un effet positif faible mais significatif.

Le résumé statistique du modèle (`summary()`) confirme la forte significativité de la majorité des variables explicatives ( $p < 0.001$ ), à l'exception de quelques catégories marginales (ex.: zones humides maritimes, et la distance aux postes), ce qui vient appuyer les résultats obtenus à travers les Odds Ratios.

Après avoir examiné l'effet relatif de chaque variable explicative à travers les odds ratios issus du modèle de régression logistique, il est désormais pertinent de compléter cette analyse par une autre approche, celle de la visualisation des probabilités estimées. En effet, si les odds ratios permettent de quantifier l'influence directionnelle et l'ampleur d'une variable sur la probabilité d'obtention d'un permis, l'étude des probabilités offrent une lecture directe de cette probabilité en fonction de chaque critère. Ces représentations permettent ainsi de mieux saisir la dynamique et la forme des relations (linéaires, seuils, plateaux, etc.), tout en facilitant l'interprétation concrète des effets observés.

Il faut noter la plupart des graphiques de probabilités ont une forme de courbe qui peut être influencée par le déséquilibre structurel des données (beaucoup de 0, très peu de 1), ce qui limite la lisibilité directe de l'effet du critère sur la probabilité estimée en écrasant fortement la courbe.

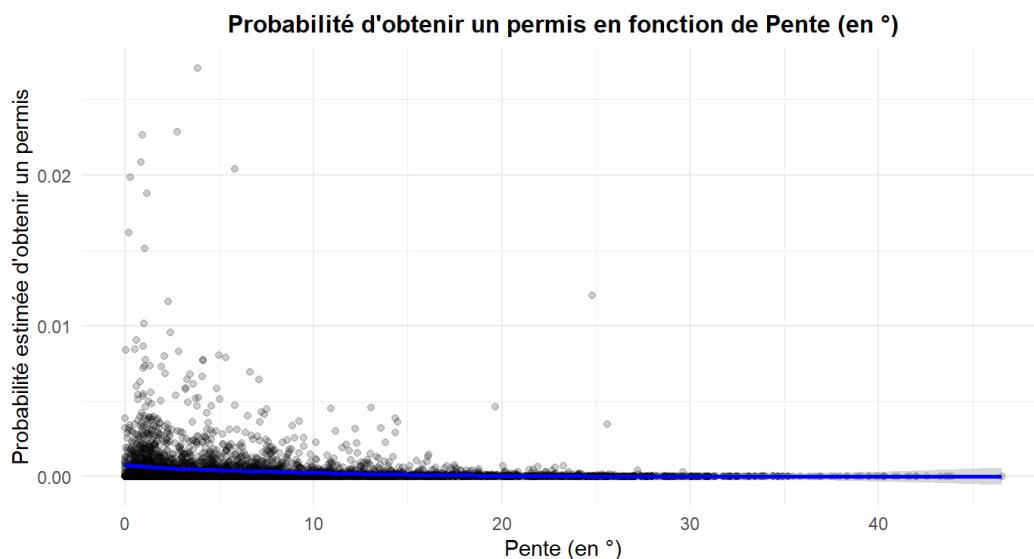
Pour ce qui est du potentiel solaire on observe une légère augmentation de la probabilité à partir d'environ 1550 kWh/m<sup>2</sup>/an, (*cf. graphique 27*) ce qui suggère que des niveaux élevés d'ensoleillement favorisent bien l'installation de projets photovoltaïques.



Graphique 27 : Probabilité d'obtenir un permis en fonction du potentiel solaire

Cependant, cette relation reste faiblement marquée dans le modèle global, probablement car la grande majorité des parcelles sans permis couvrent déjà tout le spectre de potentiel solaire. Cela montre que ce critère, bien qu'important techniquement, n'est pas seul discriminant dans le processus de sélection des sites.

On observe clairement une relation négative entre la pente d'une parcelle et la probabilité estimée d'obtenir un permis pour un projet photovoltaïque au sol.



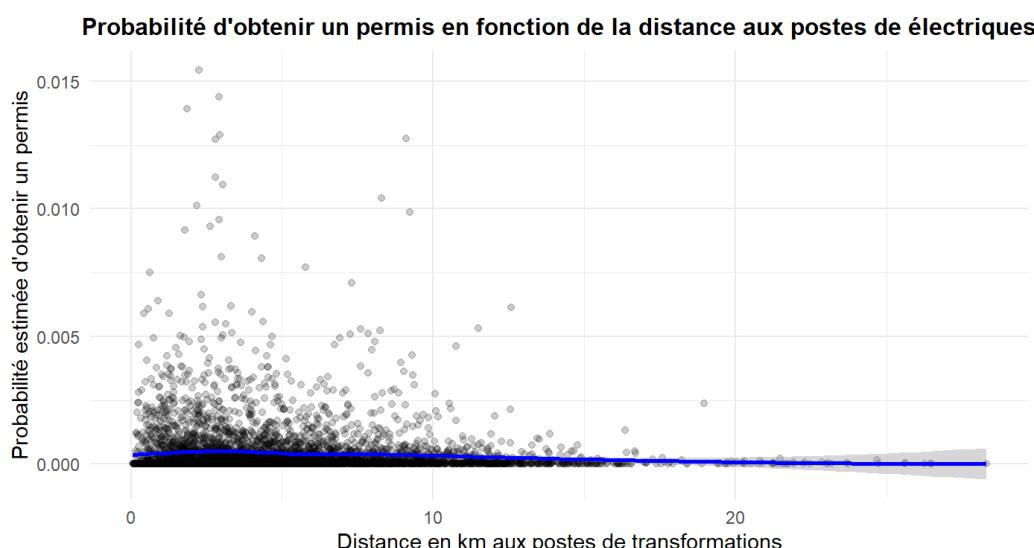
Graphique 28 : Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la pente

On observe une forte concentration des probabilités non nulles pour des pentes très faibles, inférieures à 5°, avec une décroissance nette au-delà de ce seuil. (*cf. graphique 28*)

La courbe bleue de tendance traduit cette dynamique, plus la pente augmente, plus la probabilité diminue rapidement. Cela confirme les résultats des odds ratios précédemment analysés, qui montrent un effet négatif significatif de la pente sur l'obtention d'un permis.

Il est important de noter que la courbe reste assez cohérente, malgré le déséquilibre structurel des classes (très peu de permis par rapport au nombre total de parcelles). Ce déséquilibre est ici moins problématique que pour d'autres variables, car les valeurs faibles de pente concentrent déjà une large majorité des observations pertinentes.

Il y'a une relation faiblement négative entre la distance aux postes de transformation et la probabilité d'obtenir un permis.



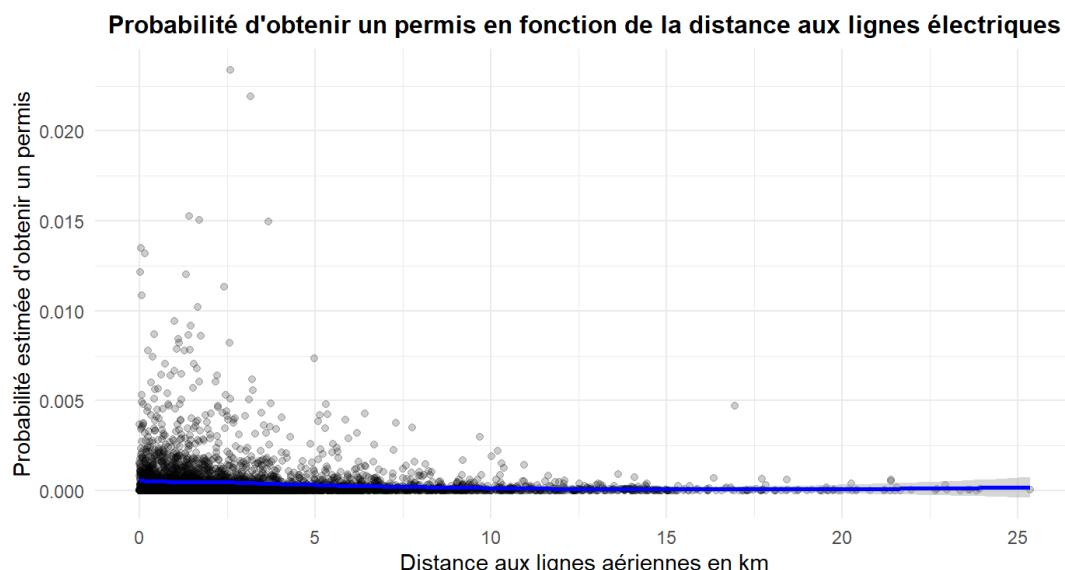
Graphique 29 : Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la distance aux postes électriques

La courbe de tendance (*cf. graphique 29*) bien que relativement plate, présente une légère baisse au fur et à mesure que la distance augmente, surtout au-delà de 10 km.

Cela suggère que les parcelles situées à proximité des postes de transformation bénéficient d'une probabilité légèrement plus élevée d'obtenir un permis. Cette tendance peut s'expliquer par les coûts moindres de raccordement au réseau électrique, un critère important dans les projets photovoltaïques. Toutefois, la faible pente de la courbe et l'étalement des points illustrent que cette variable n'est pas fortement discriminante à elle seule.

De plus, la forme aplatie de la courbe est à interpréter avec prudence, notamment en raison du déséquilibre important des classes (peu de permis pour un grand nombre de parcelles). Ce déséquilibre tend à comprimer visuellement les probabilités autour de zéro, masquant potentiellement des effets plus nets localement.

Encore une fois on note une relation clairement décroissante entre la distance aux lignes électriques aériennes et la probabilité estimée d'obtenir un permis.



Graphique 30 : Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la distance aux lignes électriques

La courbe de tendance (*cf. graphique 30*) est nettement orientée à la baisse, en particulier sur les premiers kilomètres, suggérant que plus une parcelle est proche d'une ligne électrique, plus elle a de chances d'être autorisée pour un projet photovoltaïque.

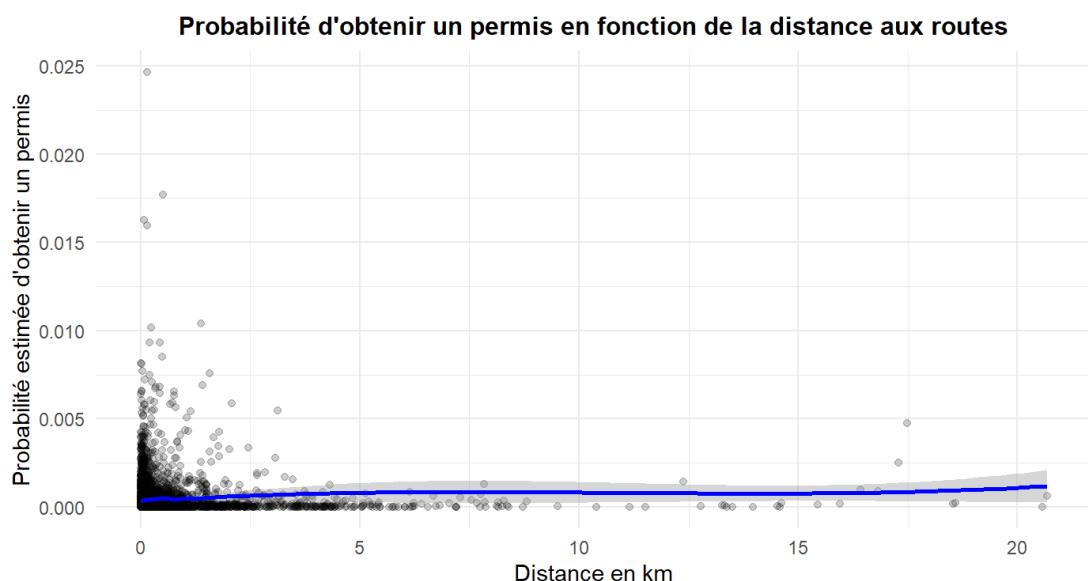
Cette tendance est cohérente avec les résultats observés dans les odds ratios, où la variable « distance aux lignes » présentait un effet négatif significatif. Cela s'explique par des coûts de raccordement moindres et une logistique d'installation simplifiée lorsque les infrastructures électriques sont à proximité immédiate du site.

On observe une concentration importante de points pour des distances faibles (entre 0 et 5 km), où la probabilité d'autorisation reste légèrement plus élevée que sur le reste de l'échelle. Au-

delà de 10–15 km, la probabilité chute fortement et tend vers zéro, confirmant que l'éloignement constitue un frein important.

Il convient néanmoins de rappeler que les probabilités absolues restent faibles du fait du déséquilibre structurel des données (très peu de permis délivrés comparé au nombre total de parcelles), ce qui comprime visuellement les valeurs. Néanmoins, les tendances relatives restent robustes.

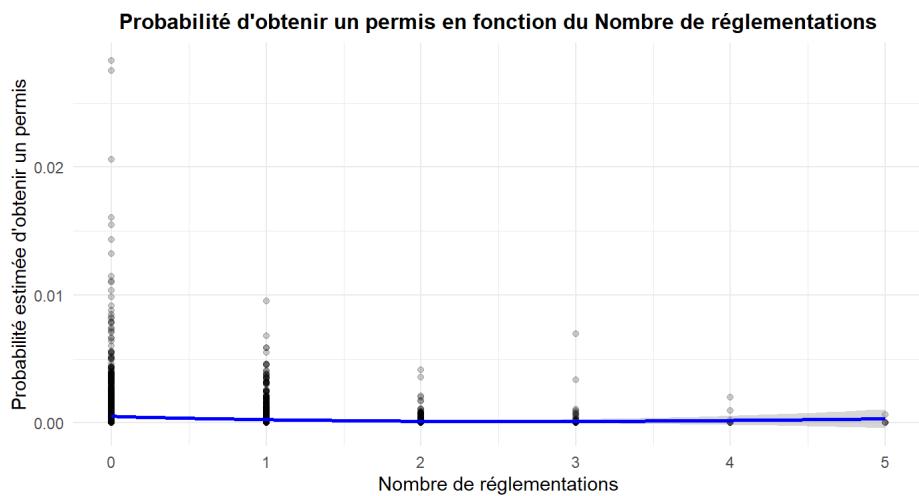
Contrairement aux autres critères de distance la distance aux routes montre que la probabilité estimée d'obtenir un permis reste très faible dans l'ensemble ( $< 2.5\%$  (*cf. graphique 31*) ce qui est attendu vu le déséquilibre dans les données.



Graphique 31 : Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la distance aux routes

Toutefois, la courbe de tendance présente une légère hausse avec la distance aux routes, cela confirme ce que suggérait l'odds ratio ( $> 1$ ), à savoir que, toutes choses égales par ailleurs, la probabilité augmente légèrement avec la distance. Ce résultat peut paraître contre-intuitif, mais il suggère que les projets ne sont pas systématiquement favorisés à proximité immédiate des routes, peut-être parce que certains terrains plus éloignés sont moins contraints réglementairement ou foncièrement.

Pour le critère du nombre de réglementations sur une parcelle on observe une relation globalement négative entre le nombre de réglementations affectant une parcelle et la probabilité d'y obtenir un permis photovoltaïque.

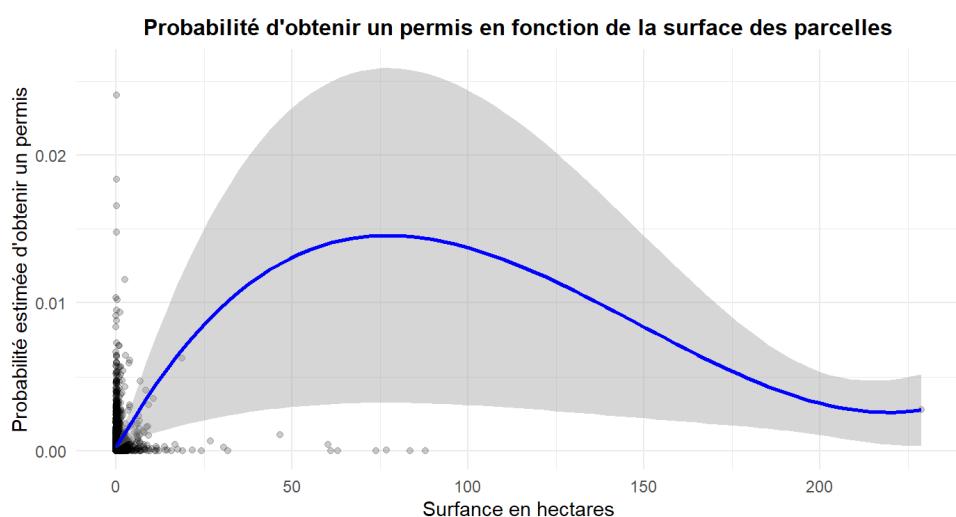


Graphique 32 : Probabilité d'obtenir un permis en fonction du nombre de réglementations

La courbe de tendance (*cf. graphique 32*) montre que plus une parcelle est soumise à un nombre élevé de réglementations (zonages, protections environnementales, etc.), plus la probabilité estimée d'obtenir un permis est faible. Ce résultat est cohérent avec les analyses précédentes, notamment les odds ratios inférieurs à 1 pour cette variable, qui indiquaient déjà un effet défavorable des contraintes réglementaires sur l'octroi de permis.

Visuellement, la majorité des parcelles avec des probabilités non nulles se concentrent autour de 0 ou 1 contrainte, tandis que les parcelles ayant 3, 4 ou 5 réglementations affichent des probabilités quasi nulles. Cette tendance semble traduire une certaine frilosité administrative ou technique à autoriser des projets sur des terrains juridiquement complexes ou sensibles, ce qui est compréhensible au regard des procédures d'autorisation souvent plus longues, coûteuses, voire impossibles à mener à bien dans ces contextes.

Enfin on observe une relation non linéaire entre la surface des parcelles (en hectares) et la probabilité estimée d'obtenir un permis pour une installation photovoltaïque au sol.



Graphique 33 : Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la surface des parcelles

On remarque d'abord une augmentation progressive de la probabilité avec la taille de la parcelle, jusqu'à un certain seuil situé autour de 80 à 100 hectares (*cf. graphique 33*). Cela traduit sans doute une préférence pour des terrains de taille intermédiaire à grande, offrant une emprise suffisante pour des projets rentables, sans pour autant poser de difficultés d'aménagement. Cependant, au-delà de cette taille, la courbe montre une baisse de la probabilité. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs comme le fait que les très grandes parcelles sont plus rares et peuvent être soumises à des enjeux fonciers, agricoles ou environnementaux spécifiques (zonages, protections, conflits d'usage etc). Ou le fait que les terrains trop vastes peuvent aussi complexifier les démarches administratives, ou dépasser les capacités techniques/financières des porteurs de projets. Ainsi ce graphique de probabilité pour le critère de surface suggère qu'il existerait une zone optimale de surface pour maximiser les chances d'obtenir un permis, ni trop petite, ni trop grande. Cette interprétation complète utilement les résultats issus des odds ratios, qui montraient un effet positif modéré mais significatif de la surface sur la probabilité d'autorisation.

#### **4.4 Conclusion statistique sur les déterminants de l'implantation du photovoltaïque au sol en région PACA**

Parmi les variables mobilisées, l'occupation du sol ressort nettement comme le déterminant principal. Les terrains tels que les mines, décharges et chantiers, ou encore les zones peu végétalisées ou déjà anthropisées, affichent des effets très marqués. Ces espaces, souvent délaissés pour d'autres usages, sont préférentiellement mobilisés pour le photovoltaïque, traduisant des logiques d'évitement des conflits d'usage et de compatibilité avec les contraintes environnementales.

Les variables d'accessibilité et de raccordement, comme la distance aux lignes électriques et aux postes de transformation, jouent également un rôle significatif. Les résultats confirment une préférence pour les parcelles facilement accessibles et proches des infrastructures, ce qui reflète des considérations de logistique, de coûts de raccordement et de faisabilité technique. Néanmoins un point de tension intéressant concerne la variable de distance aux routes. D'un côté, la distribution brute montre très clairement que la majorité des parcelles ayant obtenu un permis se situent à moins de 1 km d'une route, ce qui suggère une forte préférence pour des terrains facilement accessibles. Toutefois, les résultats de la régression logistique – à la fois via les odds ratios et les courbes de probabilité indiquent que plus la distance à une route augmente, plus la probabilité d'obtenir un permis tend à augmenter également. Ce paradoxe apparent peut s'expliquer par le fait que les terrains proches des routes sont extrêmement nombreux dans la base de données, ce qui engendre une concentration mécanique de permis dans ces zones. En revanche, lorsqu'on isole statistiquement l'effet de la distance aux routes (en tenant compte des autres variables), on observe que les parcelles un peu plus éloignées ont en réalité une probabilité légèrement supérieure d'accueillir un projet. Cela peut être lié à des considérations d'évitement des conflits d'usage ou à une volonté de s'éloigner des zones trop anthropisées, tout en restant relativement accessibles. Ce cas illustre bien l'importance de croiser lecture descriptive et modélisation statistique pour éviter les interprétations trompeuses.

Du côté des caractéristiques physiques, la pente apparaît comme un critère défavorable : plus elle est forte, plus la probabilité d'obtenir un permis diminue. La surface présente un effet non linéaire : les petites et très grandes surfaces sont moins favorisées, au profit de surfaces intermédiaires, probablement jugées plus optimales sur les plans foncier et technique. Le potentiel solaire, quant à lui, a un effet positif mais modéré, confirmant qu'un bon ensoleillement est une condition importante...

Enfin, la présence de réglementations tend à freiner les autorisations. Plus une parcelle est soumise à des réglementations, plus la probabilité de permis diminue, ce qui suggère que les contraintes juridiques ou environnementales sont prises en compte dans le processus décisionnel.

Malgré la bonne performance globale du modèle ( $AUC = 0.897$ ), ces variables ne suffisent pas à expliquer l'ensemble du phénomène (selon le  $R^2$  de à 0.144). D'autres éléments, non observés ici mais essentiels, peuvent intervenir comme des dynamiques et politiques locales, stratégies ciblées d'acteurs (promoteurs, collectivités, etc.), de l'acceptabilité sociale et de conflits territoriaux, ou encore d'effets d'opportunité liés au foncier ou aux appels d'offres.

Autrement dit, ces variables constituent une base robuste pour comprendre les implantations photovoltaïques, mais elles ne capturent pas toutes les dimensions du phénomène.

Les résultats permettent de valider partiellement l'hypothèse d'une dépendance au chemin (*path dependency*). On constate une certaine homogénéité des profils des parcelles autorisées, il s'agit de terrains similaires, avec des logiques, et des techniques récurrentes. Cela traduit une forme d'inertie dans les décisions d'aménagement, liée à la reproductibilité des conditions jugées favorables. Cependant, la présence de cas atypiques montre aussi que des marges de flexibilité existent, et que le modèle d'implantation n'est pas totalement figé de plus on remarque une augmentation de chance d'avoir une parcelle avec permis avec l'augmentation de la distance aux routes. Ces cas hors norme qu'il s'agisse de parcelles très éloignées des infrastructures, présentant des contraintes topographiques importantes, ou situées sur des types de sols peu représentés suggèrent que des facteurs contextuels ou opportunistes peuvent parfois primer sur les logiques standardisées. Ainsi, Les résultats permettent de valider partiellement l'hypothèse d'une dépendance au chemin (*path dependency*), en ce sens que les décisions d'implantation semblent s'appuyer sur des schémas reproductibles, favorisant des types de parcelles déjà éprouvés dans le passé. Autrement dit, les choix actuels s'inscrivent dans une continuité des pratiques antérieures, où certains critères (comme la nature du sol, la pente ou la proximité aux réseaux) tendent à être systématiquement reconduits. Cette logique traduit une forme d'inertie institutionnelle ou technique dans l'aménagement, caractéristique des processus de dépendance au chemin. Toutefois, cette tendance n'est pas absolue : l'émergence de cas atypiques témoigne de la capacité du système à s'ajuster ponctuellement à des opportunités ou à des contextes locaux, ce qui relativise l'idée d'un modèle totalement verrouillé.

## Conclusion

Les logiques d'implantation de panneaux photovoltaïques au sol en région PACA dépendent d'une multitude de critères, d'interactions et de dynamiques. Ce travail a cherché à en identifier

les principales tendances, en mettant en lumière les facteurs les plus influents. Toutefois, la décision d'implanter ou non une centrale photovoltaïque ne repose pas uniquement sur l'addition de critères techniques, elle relève d'arbitrages complexes, dépendants du contexte territorial et des dynamiques locales.

Premièrement, la hiérarchisation des critères n'obéit pas à un ordre fixe. Les porteurs de projet accordent plus ou moins d'importance à certains paramètres selon le contexte spatial, mais aussi en fonction des enjeux économiques. Ce travail s'est attaché à modéliser les critères techniques et réglementaires qui paraissent centraux dans le processus de décision. Néanmoins, de nombreux facteurs, non modélisables, interviennent également, en réalité, les logiques d'implantation spatiale des projets photovoltaïques en PACA ne répondent ni à une seule logique ni à une combinaison immuable de critères, mais dépendent fortement des spécificités locales.

Cela étant, l'analyse des critères techniques et réglementaires a permis de dégager certains traits communs aux projets autorisés. Le critère le plus discriminant semble être le type d'occupation du sol. Ce critère se fonde à la fois sur les caractéristiques physiques des terrains et sur leur catégorisation administrative ou humaine. Cela semble cohérent, une installation photovoltaïque ne peut être envisagée sur n'importe quel sol. Elle suppose une prise en compte fine des propriétés physiques du site mais aussi de l'usage qui y est permis ou envisagé.

Par ailleurs, des critères techniques comme la pente ou l'ensoleillement (potentiel solaire) apparaissent déterminants. Toutefois, dans le cas de la région PACA, le potentiel solaire, particulièrement élevé et homogène, ne constitue pas une contrainte différenciante majeure. En ce qui concerne la surface des parcelles, celles bénéficiant d'un permis sont souvent relativement petites (15 % font moins d'un hectare), ce qui laisse supposer que nombre de projets reposent sur le regroupement de plusieurs parcelles contiguës.

L'analyse a également mis en évidence une certaine forme de dépendance au chemin (path dependency), notamment en ce qui concerne la proximité aux lignes électriques et aux postes de transformation. Les projets situés à proximité de ces infrastructures existantes semblent privilégiés, probablement en raison de la simplification des raccordements.

La distance aux routes constitue toutefois une exception notable. L'analyse révèle que plus une parcelle est éloignée des routes, plus elle a de chances d'obtenir un permis. Plusieurs explications sont envisageables : la volonté d'éviter les conflits d'usage, la réduction de l'impact paysager, une corrélation avec d'autres variables du modèle, ou encore un effet de densité. En effet, la base de données contient une forte concentration de parcelles proches des routes. Or, ces zones génèrent statistiquement plus de parcelles sans permis. Même si, en valeur absolue, elles accueillent de nombreux projets autorisés, leur proportion de permis est inférieure à celle des zones un peu plus éloignées. Ainsi malgré les apports de cette analyse et les tendances dégagées, il demeure essentiel de souligner un certain nombre de limites inhérentes au modèle utilisé, tant sur le plan méthodologique que dans sa capacité à saisir la complexité réelle des dynamiques d'implantation photovoltaïque.

Une première limite réside dans le choix des seuils appliqués aux critères du modèle multicritère. Certains critères possédaient des seuils jugés « éliminatoires », attribuant automatiquement une note de 0 à une zone, ce qui entraînait son exclusion totale de l'analyse, même si tous les autres critères étaient favorables. Il aurait sans doute été plus pertinent de pondérer davantage ces seuils ou, à tout le moins, d'éviter une exclusion systématique. En effet, cela a pu conduire à écarter des zones qui, dans les faits, auraient pu présenter un bon potentiel pour l'implantation photovoltaïque, mais ont été disqualifiées sur la base d'un seul critère trop rigide. Il convient également de souligner que les seuils définis pour chaque critère reposent en grande partie sur des choix subjectifs, bien qu'ils aient été partiellement guidés par des réalités de terrain et certaines pratiques communément admises. Cette subjectivité limite la capacité du modèle à intégrer des situations atypiques ou des cas exceptionnels. Par ailleurs, le modèle s'appuie exclusivement sur des critères techniques et réglementaires, alors que l'implantation de projets photovoltaïques est un phénomène bien plus complexe, influencé par des dynamiques économiques, sociales et politiques que l'analyse ne prend pas en compte. Malgré ces limites, le modèle s'est montré globalement pertinent pour prédire les véritables cas de permis. Néanmoins, un travail plus approfondi, couplé à une approche interdisciplinaire, permettrait d'améliorer significativement la capacité à analyser ce phénomène dans toute sa complexité.

Enfin, une dernière limite tient à l'échelle d'analyse adoptée. Le présent travail se base sur une approche régionale, ce qui, par définition, limite la précision de l'analyse, alors même que l'implantation de centrales photovoltaïques au sol répond à des logiques essentiellement locales. Si cette échelle permet de dégager des tendances générales et des dynamiques spatiales à l'échelle de la région PACA, elle ne permet pas de saisir les subtilités propres à certains territoires. Une suite possible à ce travail pourrait consister à cibler des zones spécifiques, comme celle située entre le Vaucluse et les Alpes-de-Haute-Provence, où de nombreux permis ont été délivrés malgré une classification « non favorable » par le modèle. Une analyse plus fine de ces cas permettrait de mieux comprendre les raisons de cette discordance marquée entre les prédictions du modèle multicritère et la réalité observée sur le terrain.

Par ailleurs, à une échelle plus locale, il aurait été pertinent d'intégrer une donnée particulièrement influente dans le phénomène étudié : le Plan Local d'Urbanisme (PLU). En effet, comme mentionné en introduction, l'implantation de panneaux photovoltaïques au sol dépend fortement des prescriptions du PLU, qui vient préciser et encadrer les usages possibles du foncier. Le PLU aurait ainsi pu compléter utilement l'information fournie par l'occupation du sol. Toutefois, cette donnée n'a pas pu être mobilisée dans ce travail, car elle n'est pas disponible de manière homogène à l'échelle régionale. Une perspective intéressante consisterait donc à prolonger l'analyse par des « zooms » territoriaux sur des zones jugées significatives, en reconstituant un modèle multicritère à une échelle plus fine, incluant les zonages du PLU, puis en menant une nouvelle régression logistique adaptée à ce niveau d'analyse locale.

En définitive, ce travail a permis de mieux comprendre les logiques d'implantation des projets photovoltaïques au sol en région PACA, en identifiant les principaux critères techniques et réglementaires qui sous-tendent les décisions d'aménagement. S'il ne prétend pas à

l'exhaustivité, ce mémoire met en lumière la complexité de ces logiques, à la croisée d'enjeux techniques, fonciers, politiques et territoriaux. Les résultats obtenus, bien que limités par les choix méthodologiques et l'échelle d'analyse, offrent une base solide pour enrichir les réflexions autour de la planification énergétique régionale. Ils ouvrent également des pistes concrètes pour de futurs travaux, notamment à des échelles plus fines ou en intégrant des données plus qualitatives comme le PLU. Dans un contexte de forte pression sur le foncier et d'accélération nécessaire de la transition énergétique, il devient crucial de mieux outiller les acteurs publics et privés pour qu'ils puissent concilier développement des énergies renouvelables, préservation des territoires et acceptabilité locale. Ce type d'analyse, fondé sur une approche territoriale fine, apparaît ainsi comme une voie prometteuse pour guider les politiques d'aménagement et anticiper les tensions à venir. En poursuivant ce travail à des échelles plus fines et en intégrant des dimensions encore peu prises en compte (comme les documents d'urbanisme ou les dynamiques d'acteurs), il sera possible d'affiner les stratégies de développement solaire et de mieux ancrer la transition énergétique dans les réalités des territoires.

## Bibliographie :

### Documents institutionnels et sites officiels :

CEREMA. (2024). *Glossaire : Zone d'accélération pour la production d'énergies renouvelables (ZAER)*. [En ligne]. <https://reseaux-chaleur.cerema.fr>

CEREMA. (2024). *Support d'atelier CCGM – Présentation du 1er février 2024*. [En ligne]. <https://www.cerema.fr>

Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) Martinique. (s.d.). *Foire aux questions sur les Zones d'accélération des énergies renouvelables (ZAER)*. [En ligne]. <https://www.martinique.developpement-durable.gouv.fr/foire-aux-questions-zaer-a2278.html>

Légifrance. (2023). *Arrêté du 17 avril 2023 relatif aux zones d'accélération pour les énergies renouvelables*. [En ligne]. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047294244/>

Légifrance. (s.d.). *Dossier législatif : Projet de loi relatif à l'accélération de la production d'énergies renouvelables (JORFDOLE000046329719)*. [En ligne]. <https://www.legifrance.gouv.fr/dossierlegislatif/JORFDOLE000046329719/>

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. (s.d.). *Planification des énergies renouvelables : Données et ressources*. [En ligne]. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/planification-energies-renouvelables-donnees>

OFATE. (2021). *Transition énergétique et emploi* [Note de synthèse, PDF].

Préfecture de la Côte-d'Or. (2023). *Zones d'accélération des énergies renouvelables – Diaporama des webinaires novembre-décembre*. [En ligne]. <https://www.cote-d-or.gouv.fr>

Préfecture de Loire-Atlantique. (2023). *Zones d'accélération des énergies renouvelables (loi APER)*. [En ligne]. <https://www.loire-atlantique.gouv.fr>

Préfecture du Doubs. (2023). *Zones d'Accélération pour les Énergies Renouvelables (ZAER) – Présentation du Pôle ENR du Doubs, version finale du 6 octobre 2023*. [En ligne]. <https://www.doubs.gouv.fr>

Vie Publique. (s.d.). *Zéro artificialisation nette (ZAN) : comment protéger les sols ?*. [En ligne]. <https://www.vie-publique.fr/eclairage/287326-zero-artificialisation-nette-zan-comment-proteger-les-sols>

### Articles scientifiques, ouvrages et rapports :

Chabrol, M. (2020). *Énergie, territoire et path dependence : enjeux spatiaux et territoriaux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique en Provence-Alpes-Côte d'Azur* [Thèse de doctorat en géographie, Université Aix-Marseille]. Disponible en ligne.

Douzou, S., Guyon, M., & Luck, S. (2019). *Les territoires de la transition énergétique. Socio-économie de l'énergie*. Paris : Lavoisier. <https://shs.cairn.info/les-territoires-de-la-transition-energetique--9782743024437?lang=fr>

Espaces et sociétés. (2021). *Transition énergétique : le retour des lieux* (n° 182). Toulouse : Érès. <https://shs.cairn.info/revue-espaces-et-societes-2021-1?lang=fr>

Géographie, économie, société. (2017). *Villes, territoires et énergies : enjeux et défis actuels* (Vol. 19, n° 2). Paris : JLE Éditions. <https://shs.cairn.info/revue-geographie-economie-societe-2017-2?lang=fr>

Joost, S., Lassueur, T., & Caloz, R. (2004). *Modélisation spatiale de l'habitat d'espèces végétales : apports du modèle numérique d'altitude à très haute résolution*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). [https://infoscience.epfl.ch/record/63242/files/TPD\\_Lassueur.pdf](https://infoscience.epfl.ch/record/63242/files/TPD_Lassueur.pdf)

Le Gentil, E., Mongruel, R., Kalaydjian, R., et al. (2012). *Diagnostic environnemental territorial – Projet PEGASO – CASE Bouches-du-Rhône*. HAL.

Mesnard, C. (2019). *Rapport sur la recherche-action « Atelier des Landes »*. HAL.

Quaderni di Careggi. (2012). *Renewable Energy and Landscape Quality*. Fourth Careggi Seminar, Florence, Italie, Volume 04. <http://www.gfos.unios.hr/images/renewable-energy-and-landscape-quality.pdf>

D'Autilia, R. (2012, novembre). *Geothermal Power Plants and Landscape Economy*. Communication présentée lors du Fourth Careggi Seminar, Florence, Italie. Volume 04. Disponible en ligne.

Rudant, J.-P., & Frison, P.-L. (2019). *Télédétection radar : de l'image d'intensité initiale au choix du mode de calibration des coefficients de diffusion  $\beta^0$ ,  $\sigma^0$ ,  $\gamma^0$* . Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 221, 17–29. <https://rfpt.sftp.fr/index.php/RFPT/article/download/454/219>

Durand, Y. (s.d.). *Photovoltaic Power Applications in France*. Rapport pour l'International Energy Agency Cooperative Programme on Photovoltaic Power Systems – ADEME. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/49/009/49009862.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/009/49009862.pdf)

Rebotier, J., Bouisset, C., Clarimont, S., & Nobert, S. (2017). *Accompagner les changements vers des territoires résilients*. Étude des résistances territoriales dans le cadre de la transition énergétique en Aquitaine. Opposition aux infrastructures énergétiques y est discutée. PDF en ligne – HAL Archives Ouvertes : <https://shs.hal.science/halshs-01498643>

Trommetter, M. (2017). *Climat et biodiversité : Concilier énergies renouvelables et biodiversité*. L'étude mentionne les efforts de l'ADEME pour orienter les projets photovoltaïques vers des zones déjà artificialisées afin de limiter l'impact sur les sols naturels. PDF en ligne – HAL Archives Ouvertes : <https://shs.hal.science/halshs-01636152>

**Données en ligne :**

ODRE – Open Data Réseaux Énergies. (s.d.). *Part régionale de la consommation nationale couverte par filière* [Jeu de données]. <https://odre.opendatasoft.com/explore/dataset/part-regionale-consommation-nationale-couverte-par-filiere/analyze/>

## Table des illustrations :

### Graphiques

Type	Numéro	Description	Page
Graphique	1	Part régionale de la consommation nationale couverte par l'énergie solaire en France en 2023	13
Graphique	2	Part régionale des énergies renouvelables en France en 2023	13
Graphique	3	Comparaison des scénarios de pondération	53
Graphique	4	Réparation des parcelles avec permis par note (en %)	55
Graphique	5	Réparation des notes des parcelles sans permis (en %)	55
Graphique	6	Heatmap des résidus du Chi2	56
Graphique	7	Distribution de la présence de permis parmi les parcelles étudiées	60
Graphique	8	Distribution du potentiel solaire pour les parcelles avec permis	61
Graphique	9	Distribution de la pente pour les parcelles avec permis	62
Graphique	10	Distribution de la distance aux postes électriques pour les parcelles avec permis	62
Graphique	11	Distribution de la distance aux lignes électriques pour les parcelles avec permis	63
Graphique	12	Distribution de la distance aux routes pour les parcelles avec permis	64
Graphique	13	Distribution du nombre de réglementations pour les parcelles avec permis	64
Graphique	14	Distribution de l'occupation du sol pour les parcelles avec permis	65
Graphique	15	Distribution de la surface pour les parcelles avec permis	66
Graphique	16	Comparaison du potentiel solaire selon la présence de permis	68
Graphique	17	Comparaison de la pente selon la présence de permis	68
Graphique	18	Comparaison de la distance aux postes électriques selon la présence de permis	69
Graphique	19	Comparaison de la distance aux lignes électriques selon la présence de permis	70
Graphique	20	Comparaison de la distance aux routes selon la présence de permis	71
Graphique	21	Comparaison du nombre de réglementation selon la présence de permis	72
Graphique	22	Comparaison de la surface des parcelles selon la présence de permis	73
Graphique	23	Répartition des types d'occupation du sol selon la présence de permis	73
Graphique	24	Courbe ROC du modèle retenue	77

Graphique	25	Odds ratios	78
Graphique	26	Odds ratios sans l'occupation du sol	79
Graphique	27	Probabilité d'obtenir un permis en fonction du potentiel solaire	81
Graphique	28	Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la pente	82
Graphique	29	Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la distance aux postes électriques	82
Graphique	30	Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la distance aux lignes électriques	83
Graphique	31	Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la distance aux routes	84
Graphique	32	Probabilité d'obtenir un permis en fonction du nombre de réglementations	85
Graphique	33	Probabilité d'obtenir un permis en fonction de la surface des parcelles	85

## Cartes

Type	Numéro	Description	Page
Carte	1	Potentiel solaire en France métropolitaine	14
Carte	2	Pente en degré de la région PACA	24
Carte	3	Reclassement de la Pente	25
Carte	4	Potentiel solaire en région PACA	26
Carte	5	Reclassement du potentiel solaire	27
Carte	6	Distance en mètre aux postes électriques en PACA	28
Carte	7	Reclassement de la distance aux postes électriques	28
Carte	8	Distance en mètre aux lignes électriques en PACA	30
Carte	9	Reclassement de la distance aux lignes électriques	30
Carte	10	Distance aux routes en PACA	32
Carte	11	Reclassement de la distance aux routes	32
Carte	12	Nombre de réglementations environnementales en PACA	36
Carte	13	Reclassement du nombre de réglementations environnementales	37
Carte	14	Reclassement de l'occupation du sol en PACA	42
Carte	15	Potentiel d'implantation photovoltaïque au sol sans pondération	45
Carte	16	Potentiel d'implantation photovoltaïque au sol (scénario optimisation énergétique)	47
Carte	16	Potentiel d'implantation photovoltaïque (scénario : Accès facilité aux infrastructures, Optimisation économique)	48
Carte	18	Potentiel d'implantation photovoltaïque au sol (scénario Équilibre général)	50
Carte	19	Potentiel d'implantation photovoltaïque au sol (scénario «Minimisation des impacts environnementaux + facilitation de l'implantation	51
Carte	20	Validation spatiale du modèle multicritère	58

## Tableaux

Type	Numéro	Description	Page
Tableaux	1	Données utilisées pour l'analyse multicritère	20
Tableaux	2	Tableau récapitulatif des notes	23
Tableaux	3	Répartition des carreaux pour le scénario « sans pondération »	46
Tableaux	4	Pondération appliquée pour le scénario « Optimisation énergétique »	46
Tableaux	5	Répartition des carreaux pour le scénario « Optimisation énergétique »	47
Tableaux	6	Pondération du scénario « Accès facilité aux infrastructures, Optimisation économique »	48
Tableaux	7	Répartition des carreaux pour le scénario Accès facilité aux infrastructures, Optimisation économique »	49
Tableaux	8	Pondération du scénario « Équilibre général »	49
Tableaux	9	Répartition des carreaux pour le scénario « Équilibre général »	50
Tableaux	10	Pondération pour le scénario « Minimisation des impacts environnementaux + facilitation de l'implantation »	51
Tableaux	11	Répartition des carreaux pour le scénario « Minimisation des impacts environnementaux + facilitation de l'implantation »	52
Tableaux	12	Répartition des notes en fonction de la présence ou de l'absence d'un permis	54
Tableaux	13	Nomenclature de l'occupation du sol	65
Tableaux	14	Résultats et AIC issus des tests des différents modèles	75

## Schéma

Type	Numéro	Description	Page
Schéma	1	Workflow de la méthodologie	6