

Rapport final, 30 juin 2021

Observation des prix du marché photovoltaïque 2020

Auteurs

Guillaume Leguay, Planair SA

Yannick Sauter, Planair SA

Florent Jacqmin, Planair SA

La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.

La responsabilité du contenu incombe exclusivement aux auteurs.

Contenu

1.	Résumé de l'étude	5
2.	Recueil et origine des données	7
2.1	Méthodologie	7
2.2	Représentativité du marché	7
2.3	Cadre de l'étude.....	8
2.4	Statistiques sur la répartition des données.....	8
2.5	Statistiques sur les caractéristiques des données reçues	10
3.	Analyse des données	13
3.1	Ajouté – Intégré.....	14
3.2	Pertinence des données CDS	15
3.3	Comparaisons diverses	17
3.3.1	Comparaison entre les offres et les factures :	17
3.3.2	Comparaison entre les bâtiments existants et les bâtiments neufs :	17
3.3.3	Comparaison si la sécurité de chantier est incluse ou non :	18
3.3.4	Comparaison des différents types d'onduleurs :	20
3.3.5	Comparaison des différents types de toitures :	21
3.3.6	Conclusion des diverses comparaisons	23
4.	Résultats globaux	24
4.1	Courbe de référence	24
4.2	Répartition statistique du coût spécifique par plages de puissance	29
4.3	Discussion.....	30
5.	Répartition des coûts	31
5.1	Aperçu global	31
5.2	Aperçu détaillé	32
6.	Evolution dans le temps.....	35

7.	Coûts annexes et coûts réels	38
7.1	Coûts annexes	38
7.2	Impacts sur différents types de projet.....	40
7.3	Conclusion	41
8.	Facteurs influençant les coûts	43
9.	Conclusion	47
10.	Remerciements	48

1. Résumé de l'étude

Le marché photovoltaïque en Suisse comme dans le monde est en plein essor depuis plusieurs années. Le nombre de nouvelles installations photovoltaïques et la puissance photovoltaïque installée cumulée en Suisse ont une croissance exponentielle dans le temps et ont suivi la décroissance des coûts des modules photovoltaïques. Il existe plusieurs études nationales sur le volume du marché suisse¹. Le présent rapport vise à compléter ces différentes études en analysant le marché suisse spécifiquement par rapport aux coûts des installations photovoltaïques et en analysant les coûts globaux en prenant en compte tous les paramètres nécessaires à une réalisation.

Cette étude est articulée en deux parties. Une première analyse les coûts des prestations fournies par l'installateur comprenant l'acquisition des équipements et la main-d'œuvre, jusqu'à la mise en service. Cette partie regroupe les chapitres 2 à 6 et est basée sur un grand nombre de données recueillies auprès d'installateurs. La deuxième partie analyse les coûts non facturés par les installateurs, comme des honoraires de planification ou des frais d'architectes, afin d'évaluer le coût réel d'une installation photovoltaïque porté par le maître d'ouvrage. Basé sur des entretiens avec des maîtres d'ouvrage, le chapitre 7 identifie ces coûts supplémentaires. Le chapitre 8 reprend qualitativement tous les facteurs influençant les coûts.

Concernant le coût des prestations de l'installateur, 3'533 données ont été recueillies dans le cadre de cette étude. Celle-ci s'est particulièrement focalisée sur les 3'088 données d'installations ajoutées. L'analyse des facteurs influençant les coûts ne montre pas de facteur impactant trop et perturbant les données globales, toutes les données ont ainsi pu être conservées grâce au volume permettant de compenser statistiquement les différents facteurs. Il en ressort une tendance générale qui montre une très forte décroissance du coût spécifique (CHF/kWp) dans la plage de puissances très petites (<10 kWp) et une courbe très peu pentue dans la plage des grandes puissances (>300 kWp).

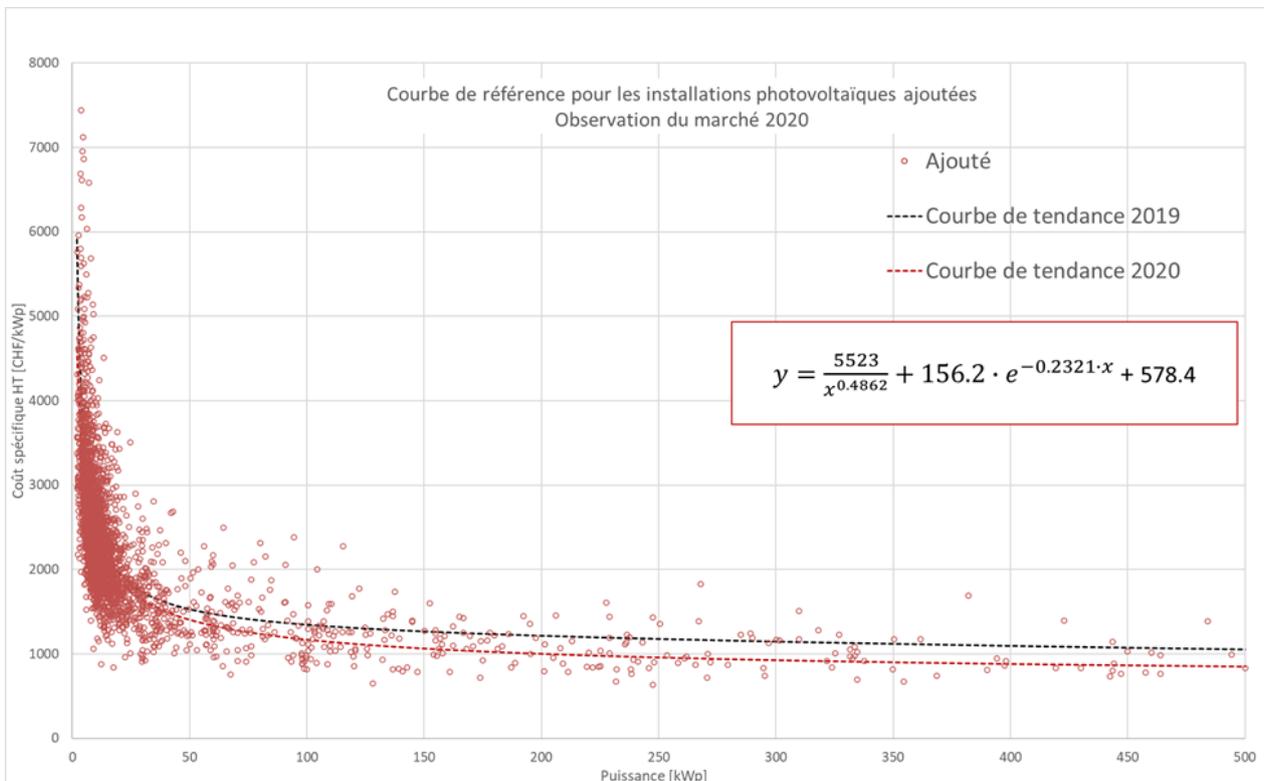


Figure 21 : Coût spécifique hors taxes des installations photovoltaïques ajoutées en fonction de la puissance avec la courbe de référence. Zoom sur la plage 2-500 kWp.

¹ Par exemple les recensements annuels du marché de l'énergie solaire réalisés par Swissolar pour le compte de l'Office fédéral de l'énergie OFEN ou les rapports de l'IEA PVPS (International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme).

La comparaison avec les données récoltées lors de l'observation du marché 2019 a indiqué une baisse des prix sur toutes les plages de puissance considérées. L'analyse de la répartition des coûts montre une évolution de cette répartition par rapport à la puissance (voir Figure 20, Figure 21 et Figure 22) : entre autres, la part du coût des modules devient plus importante lorsque la puissance augmente, alors que la part de la main-d'œuvre reste à peu près stable. Ensemble, ces deux parts représentent au moins 50% des coûts globaux, quelle que soit la puissance.

En plus des prestations de l'installateur, les maîtres d'ouvrage peuvent se retrouver face à un certain nombre de coûts annexes qui augmentent le montant global de l'installation. Parmi ces coûts supplémentaires se trouvent entre autres la gestion de projet, la planification externe, les coûts commerciaux, d'architecture et d'éventuelles études statiques ou d'étanchéité. Ils sont particulièrement importants pour les installations de tailles moyennes et grandes et peuvent augmenter de 5% à 50% le montant global de l'installation. Le coût réel d'un projet photovoltaïque n'est pas simplement celui donné par la facture de l'installateur, une analyse complète doit prendre en compte ces coûts annexes. Des projets spéciaux amèneront encore d'autres surcoûts, comme par exemple les projets avec RCP (regroupement pour la consommation propre) ou les projets qui impactent la structure porteuse (p.ex. carport).

2. Recueil et origine des données

Ce rapport présente l'analyse des données recueillies dans le cadre de l'étude des prix du marché photovoltaïque 2020. Ces données concernent l'intégralité du coût des prestations de l'installateur pour une installation photovoltaïque clé en main. Elles sont la base des analyses et des discussions des chapitres 2-6.

2.1 Méthodologie

L'étude est basée sur des offres et des factures d'installations photovoltaïques chiffrées en 2020. Une partie des données a été récoltée par un sondage auprès d'installateurs (pour un total de **1'833** installations). L'autre partie des données provient des offres reçues dans le cadre du service « check-devis-solaire » de SuisseEnergie (comparatif de devis solaires par des experts de SuisseEnergie) pour les installations principalement de puissance inférieure à 30 kWp. **1'699** données distinctes ont été reçues dans le cadre du service « check-devis-solaire » (appelé par la suite « CDS ») portant le total des données reçues pour l'étude à **3'533**. En raison du faible nombre de données disponibles en 2020 à cause de la situation Covid, les Appels d'Offres Groupés (AOG), mis en œuvre par des communes pour encourager la réalisation d'installations photovoltaïques, ne sont pas inclus dans ce rapport d'étude, contrairement au rapport d'observation 2019.

2.2 Représentativité du marché

Il est intéressant de comparer la présente étude avec le recensement du marché de l'énergie solaire réalisé par Swissolar chaque année. Comme ces rapports sortent en parallèle, nous proposons de comparer à posteriori les données du recensement du marché 2019 de Swissolar² aux rapports d'observation des prix de marché 2019 et 2020. On remarque que les répartitions des données des observations des prix de marché sont proches des données réelles recensées par Swissolar, même si les données de la plage 100-1000 kWp sont tout de même sur-représentées.

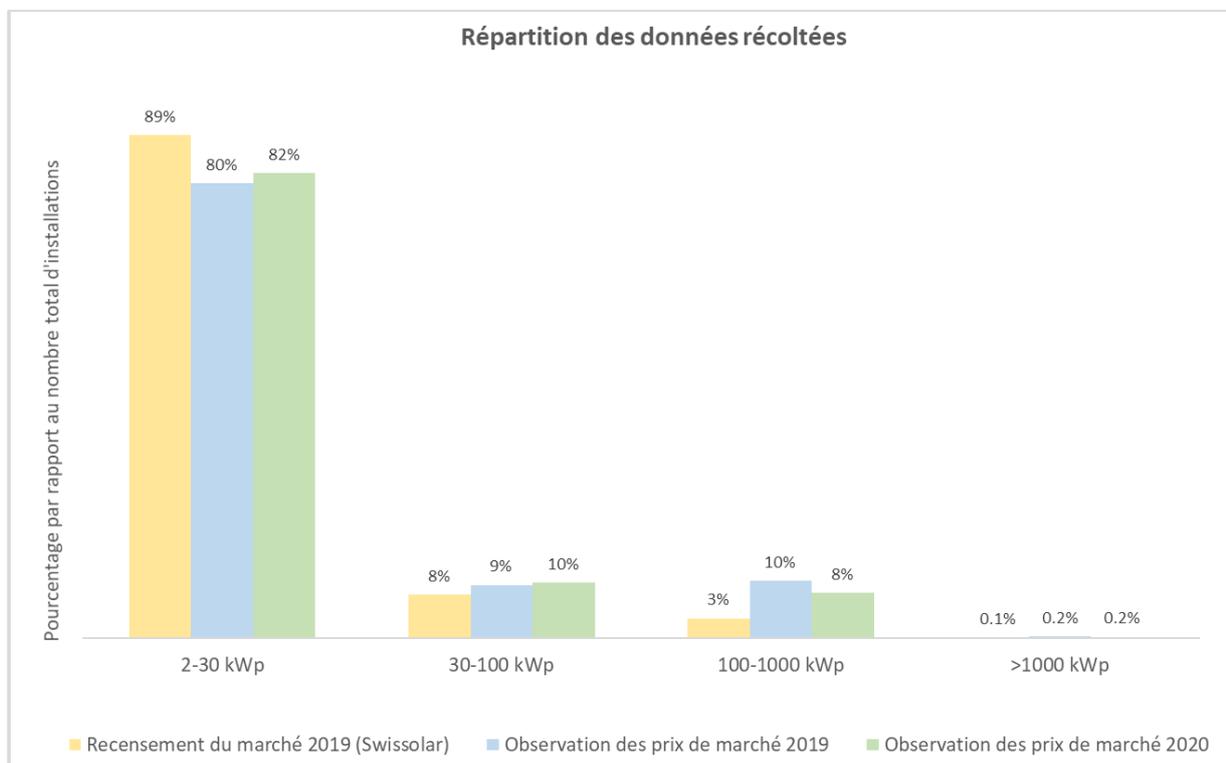


Figure 1 : répartition en pourcentage du nombre total des données collectées dans le cadre du recensement du marché 2019 réalisé par Swissolar et les observations des prix de marché 2019 et 2020

² Le recensement 2020 n'étant pas encore publié au moment de l'étude d'observation.

15'580 installations photovoltaïques raccordées au réseau ont été réalisées en 2019. En considérant une croissance du nombre d'installations de 12% (identique à la croissance 2017-2018 et 2018-2019) et que seulement un quart des offres sont réalisées, les données récoltées pour la présente étude couvriraient environ 10% du marché global 2020.

2.3 Cadre de l'étude

Les installations photovoltaïques retenues dans le cadre de l'étude correspondent aux caractéristiques présentées ci-dessous. Le coût total de chaque installation inclut les éléments suivants pour autant qu'ils aient fait partie des prestations fournies par l'installateur. Seules les prestations fournies par l'installateur sont prises en compte dans cette première partie de l'étude.

Cadre général :

- Les données sont basées sur des factures d'installations réalisées en 2020 ou sur des offres émises en 2020.
- L'étude concerne uniquement les installations photovoltaïques en toiture de bâtiments (existants ou neufs), les installations en façade ou les carports ne font pas partie de l'étude.
- Les prix ont été considérés hors taxes.

Prestations comprises dans le coût de l'installation photovoltaïque :

- Fourniture et pose des composants électriques depuis les panneaux jusqu'au disjoncteur de branchement (inclus) du bâtiment, y compris accessoires (goulottes et cheminements des câbles, coffrets).
- Fourniture et pose du système de fixation des modules, y compris lestage et fixations éventuelles à la toiture.
- Fourniture et pose du monitoring photovoltaïque (production et/ou consommation).
- Honoraires de planification de l'installateur photovoltaïque, y compris démarches administratives et dossiers d'exécution et d'exploitation.
- Fourniture et mise en œuvre des protections de chantier (sécurisation des chutes et accès toiture) et moyens de levage.
- Fourniture et mise en œuvre des équipements de sécurité permanente (lignes de vie, points d'ancrage, garde-corps).
- Pour les installations intégrées, lattage support des modules.

Prestations non comprises :

- Honoraires de planification autres que ceux de l'installateur : bureaux d'étude (planificateur PV, ingénierie statique, expertise étanchéité, architecte, maîtrise d'ouvrage, direction des travaux).
- Travaux de mise en œuvre d'un RCP : câblage, tableaux de comptage.
- Systèmes de stockage et leurs accessoires.
- Éléments de régulation pour le pilotage de la consommation : pilotage et régulation de consommateurs, par exemple pompe à chaleur ou électroménager.
- Travaux d'adaptation du bâtiment : rénovation de toiture, renforcement de structure, renforcement du réseau électrique, mise aux normes de tableaux électriques existants.
- Pour les installations intégrées, système de sous-construction de l'installation PV (écran de sous toiture, contre lattage) et ferblanterie autour du champ de modules.

2.4 Statistiques sur la répartition des données

Les données recueillies proviennent d'installateurs : ceux ayant répondu au sondage et les données obtenues dans le cadre de CDS (Figure 2). La répartition du nombre de données sur toute la plage de puissances de 2 kWp jusqu'à 2'300 kWp est présentée en Figure 3 et est en phase avec la répartition par puissance des installations réellement mises en service selon l'observation Swissolar 2019 (voir chapitre 2.2). Les données sont réparties sur l'ensemble du territoire suisse selon la Figure 4.

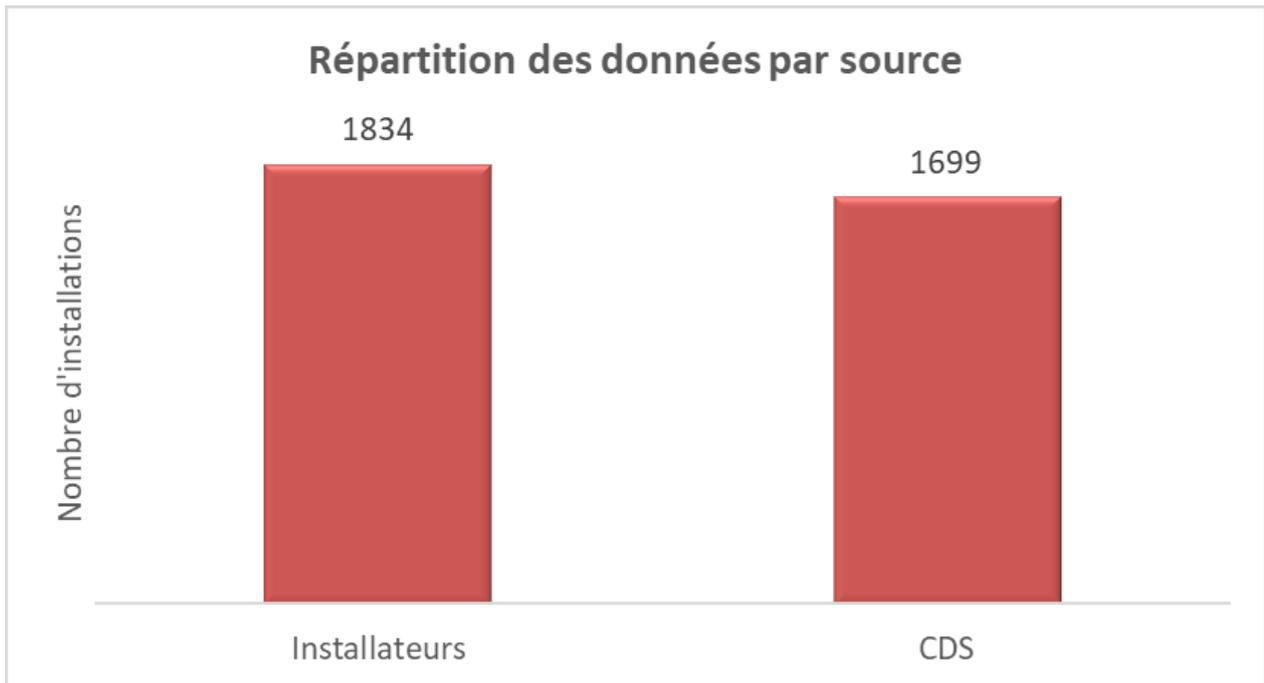


Figure 2 : Répartition des données recueillies pour l'étude selon la source. CDS correspond aux offres reçues dans le cadre du check-devis-solaire.

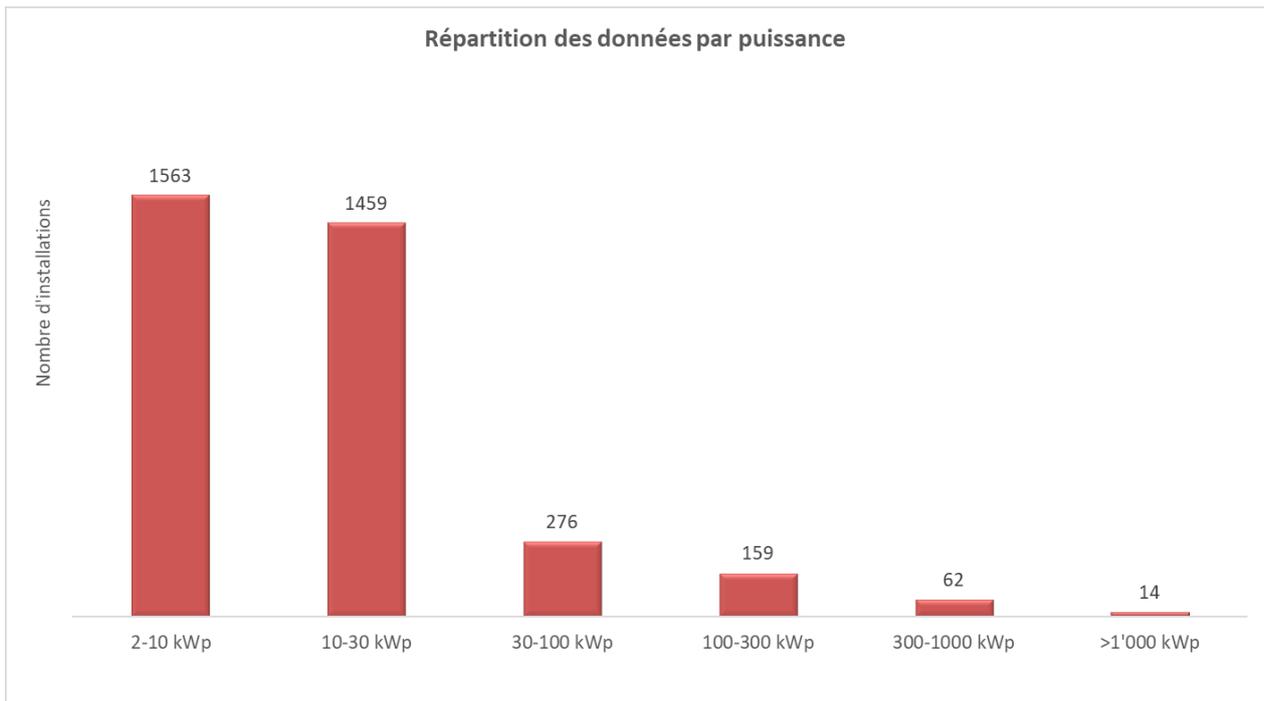


Figure 3 : Répartition des données recueillies pour l'étude selon la plage de puissance.

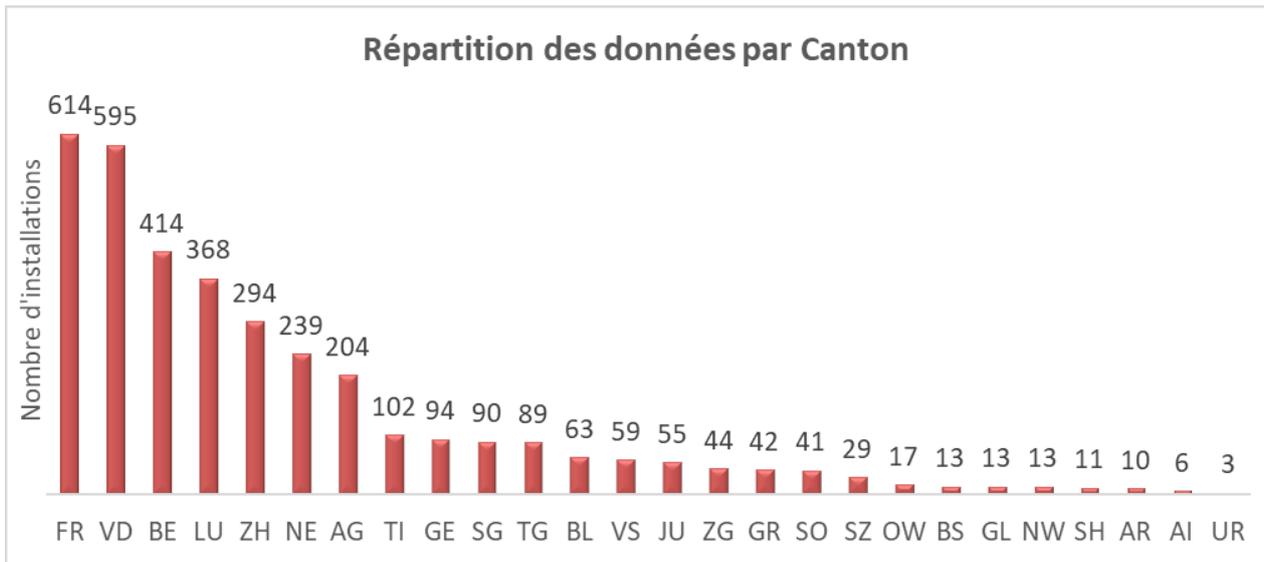


Figure 4 : Répartition des données recueillies pour l'étude selon le Canton où a lieu l'installation.

2.5 Statistiques sur les caractéristiques des données reçues

En plus de la puissance et du coût global, certaines données sur les installations étaient requises lors du sondage et du CDS. Il s'agissait de distinguer les installations ajoutées des installations intégrées et de pouvoir suivre l'évolution entre le semestre 1 et 2. Une série de caractéristiques pouvaient être également fournies optionnellement. Ce paragraphe résume l'ensemble des caractéristiques des données recueillies sur toute la plage de puissance.

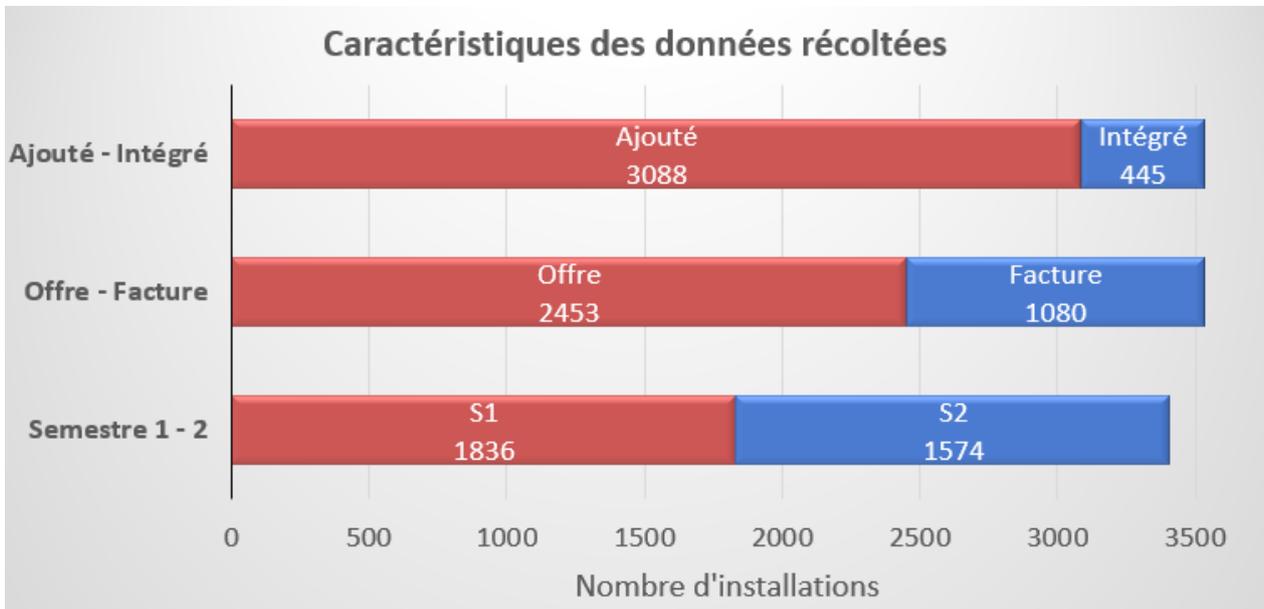


Figure 5 : Caractéristiques requises à renseigner pour chaque installation. La plupart des données reçues correspondent à des offres et à des installations ajoutées.

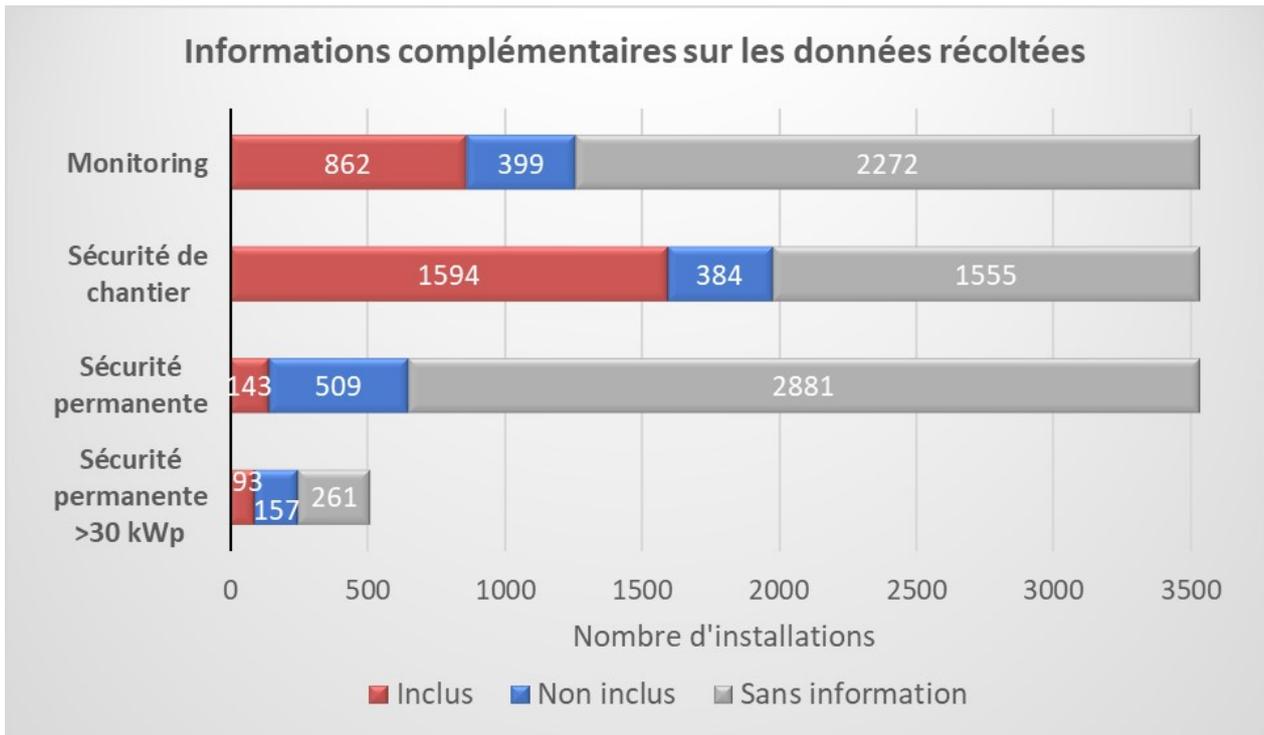


Figure 6 : Caractéristiques optionnelles qui indiquent si le monitoring, la sécurité de chantier, ou respectivement la sécurité permanente, ont été inclus dans les prestations et les coûts des installations photovoltaïques étudiées. Les 3 premières lignes donnent l'information pour toutes les installations (ajoutées et intégrées, offres et factures, toutes les puissances). La 4ème ligne précise si la sécurité permanente a été incluse dans les prestations uniquement pour les installations recueillies de plus de 30 kWp.

On peut remarquer une baisse de l'utilisation des micro-onduleurs en comparaison aux valeurs 2019, et une augmentation de la part d'installations utilisant des onduleurs avec optimiseurs.

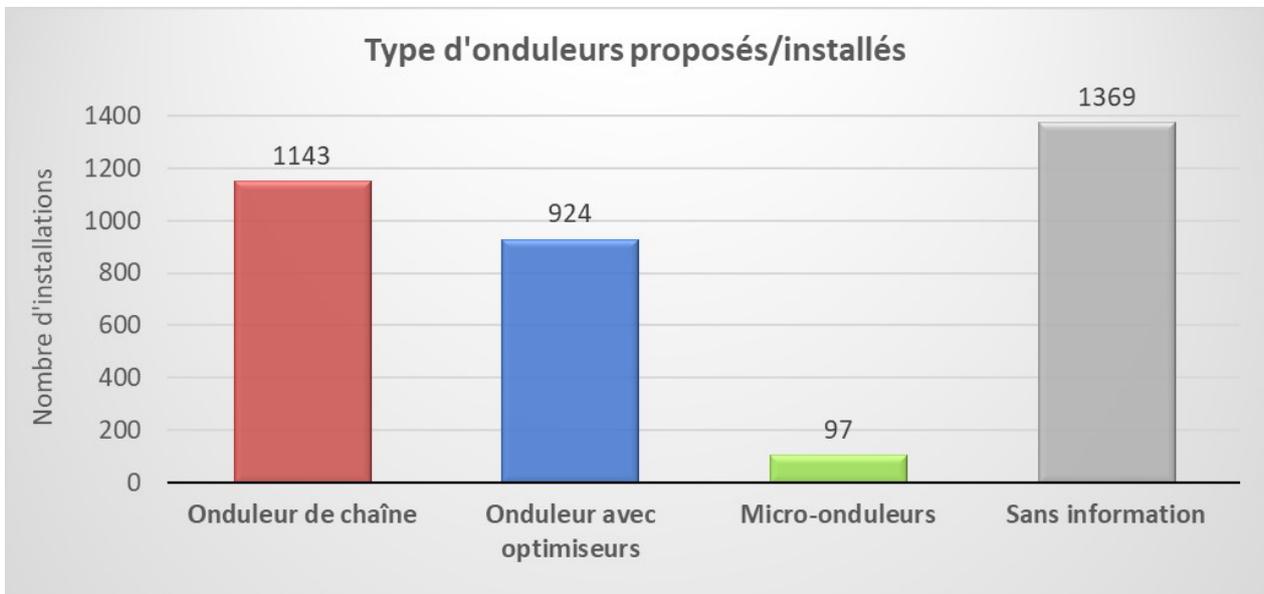


Figure 7 : Le type d'onduleur(s) proposé ou installé a été renseigné pour 2164 installations, soit 61% des données recueillies. Parmi celles-ci, on compte 53% d'onduleurs de chaîne (48% pour 2019), 43% d'optimiseurs (39% pour 2019) et 4% de micro-onduleurs (13% pour 2019).

Parmi les données renseignées la part de bâtiments neufs est importante et ne reflète évidemment pas la part réelle d'installations sur bâtiments neufs et existants, la majorité des données renseignées provient du canton de Vaud, où il est imposé d'installer du photovoltaïque sur les bâtiments neufs.

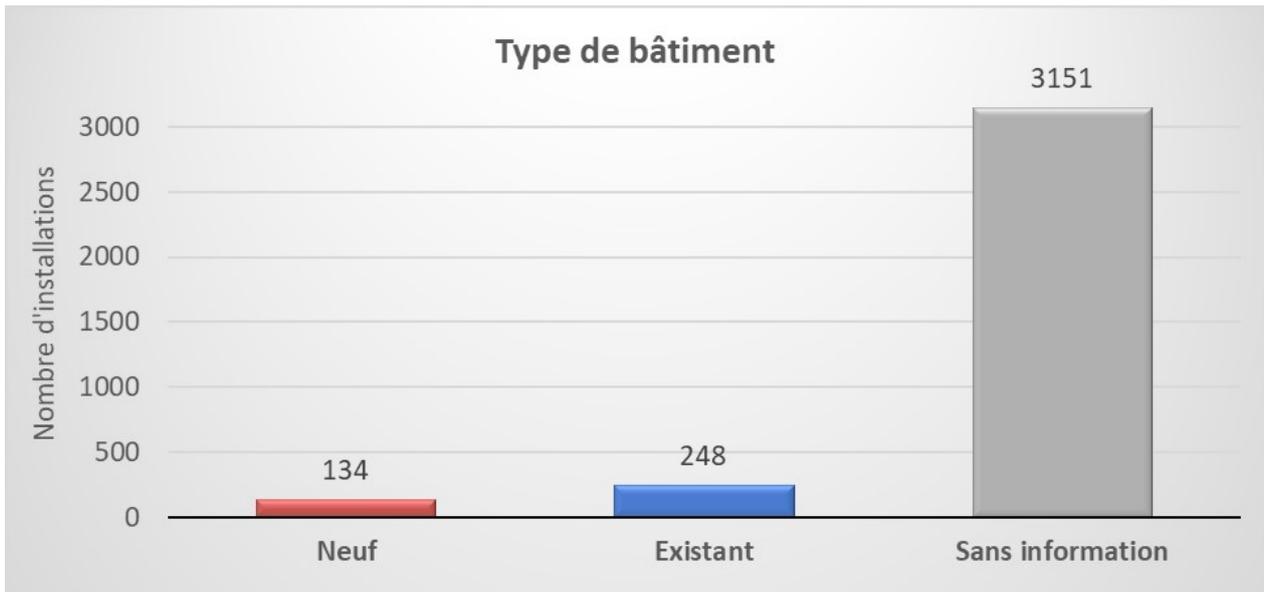


Figure 8 : Le type de bâtiment a été renseigné pour 382 installations, soit 11%, dans 65% des cas renseignés l'installation a été réalisée ou prévue sur un bâtiment existant.

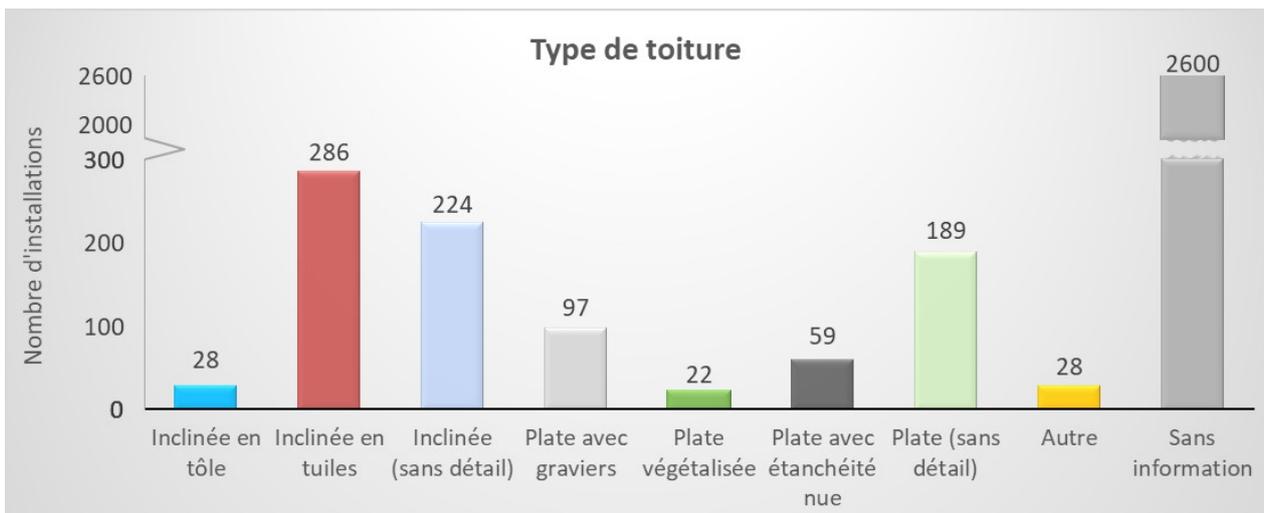


Figure 9 : Le type de toiture du bâtiment a été renseigné pour 933 installations, soit 26%, dont 58% de toits inclinés et 38% de toits plats.

3. Analyse des données



Figure 10 : Ensemble des 2'347 données recueillies pour l'étude d'observation du marché photovoltaïque 2019 avec le coût spécifique hors taxes en CHF/kWp répertorié pour chaque installation.

3.1 Ajouté – Intégré

Les Figure 11 et Figure 12 montrent la distinction du coût spécifique entre les installations ajoutées et celles intégrées. La plage de puissance a été réduite à 2-500 kWp, car il n'y a qu'une seule installation intégrée en dehors de cette plage : il s'agit de l'installation à 3'200 CHF/kWp pour 1'024 kWp, visible à la Figure 10, elle ressort clairement du nuage de points.

Les coûts des installations intégrées sont beaucoup plus dispersés que pour les ajoutées. Certaines ont en effet des coûts spécifiques inférieurs à la moyenne de ceux des installations ajoutées. Mais globalement les installations intégrées sont logiquement plus chères que les installations ajoutées. Les données semblent séparées en deux nuages de points, montrant deux tendances, peut-être dues aux installations sur toitures en rénovation ou non. Il est difficile d'analyser le coût des installations intégrées à cause du manque de contrôle ou d'uniformisation dans les prestations fournies par les installateurs. La répartition des tâches entre le couvreur et l'installateur photovoltaïque est plus flexible et les prestations varient d'un projet à un autre. Ceci se reflète dans la disparité des coûts des installations intégrées visible sur les Figure 11 et Figure 12.

Pour toute la suite de l'étude, les données des installations intégrées seront écartées et les analyses se concentreront uniquement sur les installations ajoutées, au nombre de 3'088.

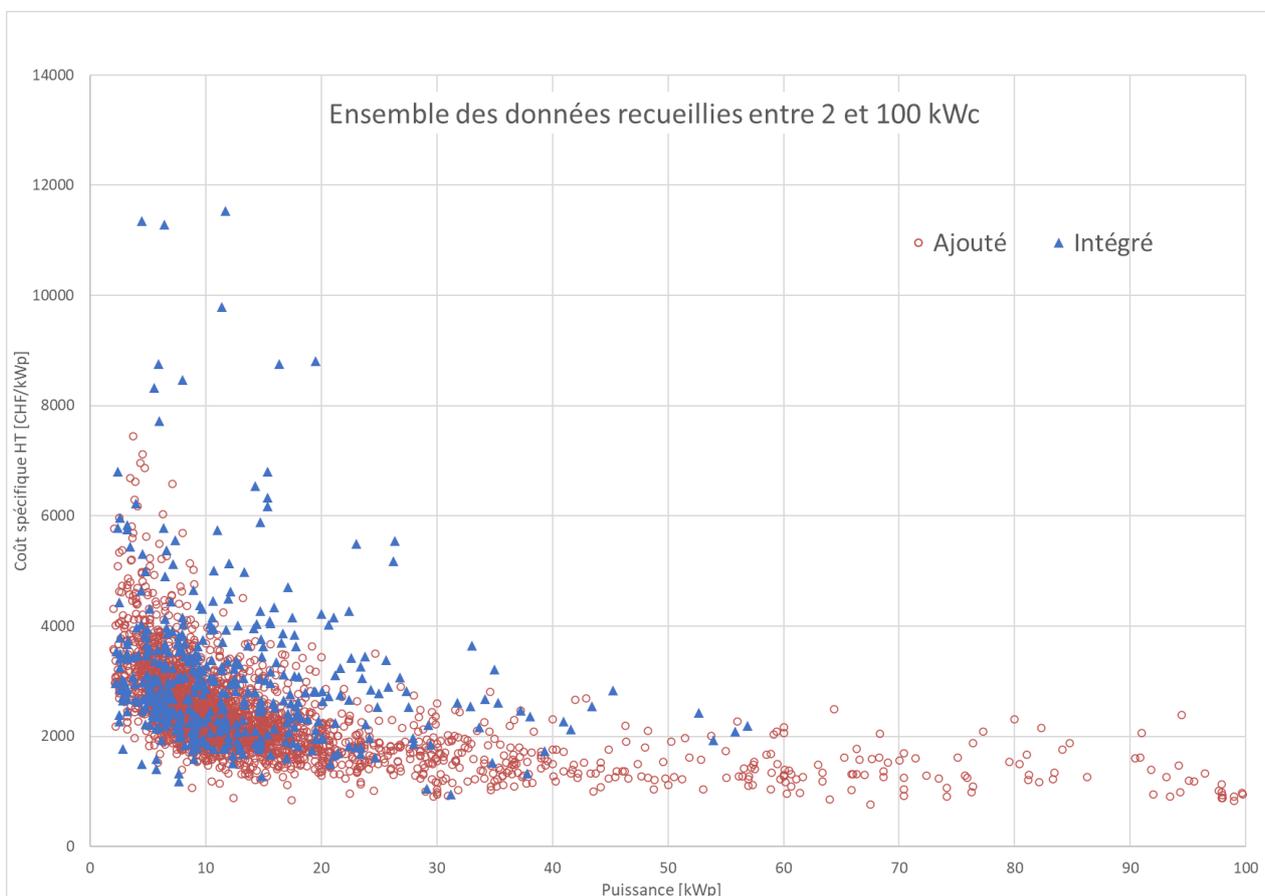


Figure 11 : Ensemble des données, réduites sur la plage 2-100 kWp, avec la distinction entre les installations ajoutées et intégrées.

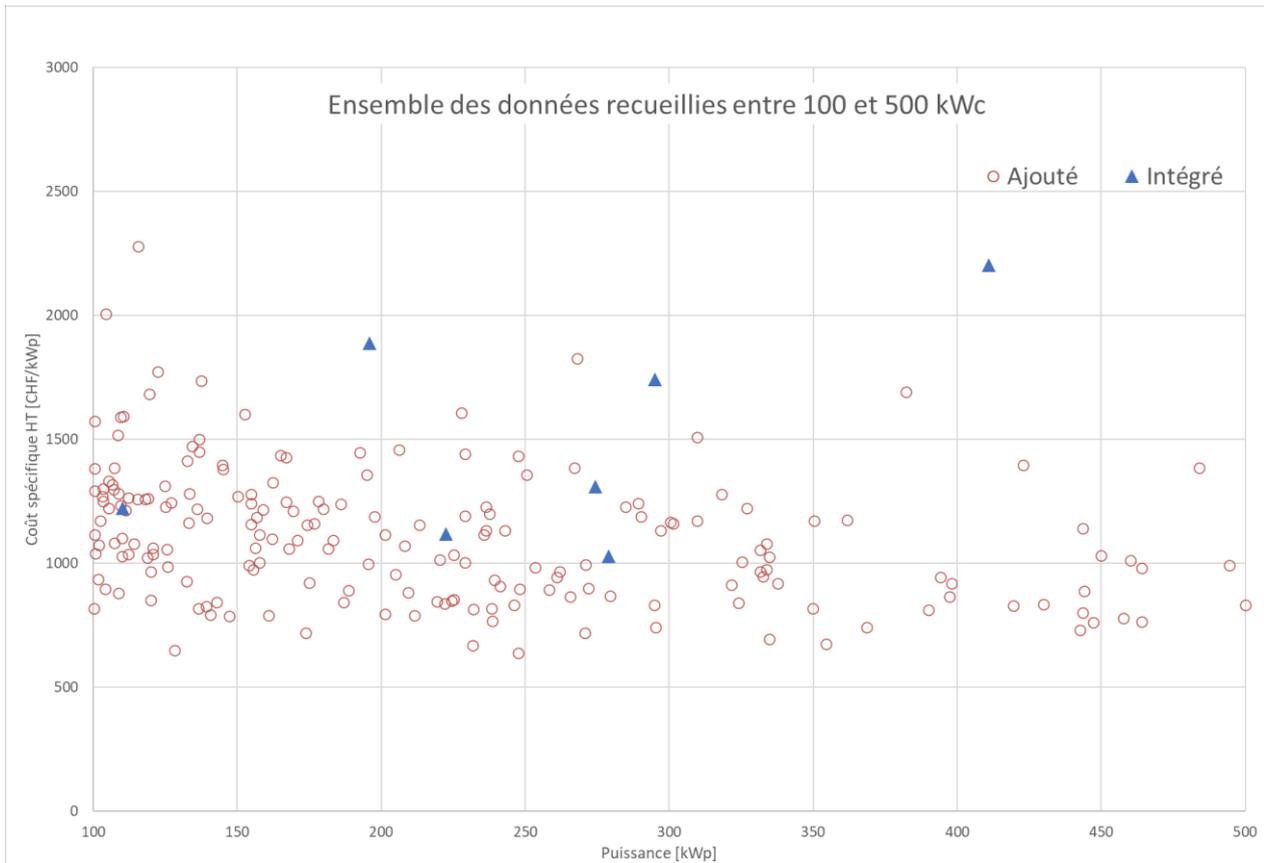


Figure 12 : Ensemble des données, réduites sur la plage 100-500 kWp, avec la distinction entre les installations ajoutées et intégrées.

3.2 Pertinence des données CDS

Les données issues du check-devis-solaire (CDS) proviennent d'installateurs variés et ne peuvent pas être maîtrisées, elles pourraient ne pas correspondre au cadre de l'étude (i.e. aux prestations définies pour les installations photovoltaïques au chapitre 2.3 Cadre de l'étude). Ce paragraphe sert à valider la pertinence des deux sources de données.

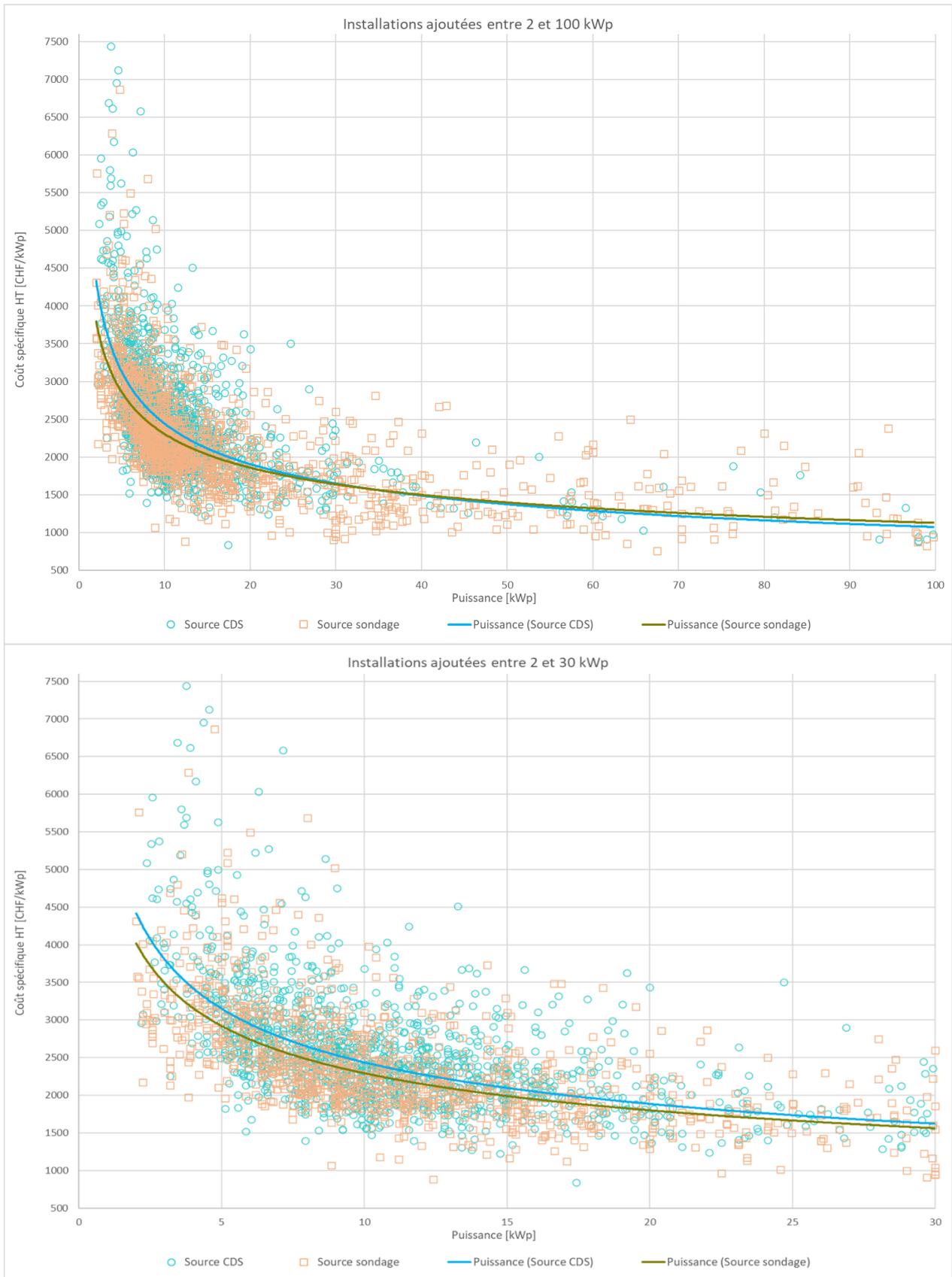


Figure 13 : Comparaison des coûts des installations ajoutées selon leur source ; les données fournies par le service check-devis-solaire et celles fournies directement par des installateurs. Les deux courbes de tendance ont été obtenues avec l'outil Excel et l'option « puissance ».

Les données CDS se situent à 97% dans la plage 2-30 kWp, soit environ 1'600 données, une cinquantaine de données se situent dans la plage 30-100 kWp (et 8 au-delà). Le sondage a permis d'obtenir environ 1'400 données pour la plage 2-30 kWp et 230 sur la plage 30-100 kWp.

La Figure 13 montre que les nuages de points des deux sources sont cohérents, les données sont en effet concentrées sur la même zone et éparpillées de manière similaire. Les données de CDC semblent toutefois plus éparpillées que les données du sondage.

Deux courbes ont été ajoutées à la Figure 13 pour indiquer les tendances. Elles ont été obtenues grâce à l'outil d'Excel « *Courbe de tendance – option courbe de puissance* ». Les deux courbes sont très rapprochées, ce qui vient confirmer la cohérence des données, mais la courbe CDS est effectivement au-dessus d'environ 10% pour les données 2-15 kWp. Cet écart est probablement dû au manque d'homogénéité des données recueillies par CDS sur cette plage de puissance.

De manière globale, ces deux sources sont cohérentes et toutes les données ont été conservées pour la suite de l'étude.

3.3 Comparaisons diverses

3.3.1 Comparaison entre les offres et les factures :

L'analyse entre offres et factures n'est pas publiée à cause de la faible représentativité des données reçues.

Le constat est souvent que les propriétaires reçoivent 2 à 3 offres pour leur installation et sélectionneraient la moins chère, qui correspondrait à la facture. C'est d'ailleurs cohérent avec le fait que nous ayons reçu 2.5 fois plus d'offres que de factures. Les petites installations présentent donc généralement des factures plus faibles que les offres. Cette tendance s'atténue (sans non plus s'inverser) sur les installations plus grandes, peut-être car elles sont plus susceptibles de subir d'éventuelles plus-values en cours de chantier qui engendreraient un surcoût conséquent sur la facture finale.

Si cette tendance se vérifie dans la réalité, la courbe de référence présentée dans ce rapport, qui inclut les factures et les offres, est donc probablement légèrement pessimiste par rapport aux coûts réels du marché.

3.3.2 Comparaison entre les bâtiments existants et les bâtiments neufs :

La Figure 14 montre la comparaison entre les installations sur des bâtiments existants et celles sur des bâtiments neufs. En dessous de 30 kWp, la courbe de tendance des bâtiments neufs se situe sous la courbe de l'ensemble des données, au-delà il y a trop peu de données pour en déduire une tendance cohérente. La courbe des bâtiments existants se confond avec celle de l'ensemble des données sur toute la plage de puissance.

On peut tirer 2 conclusions de ces constats. La première est que les installations sur bâtiments neufs sont moins chères de 10 à 20% que les installations sur bâtiments existants, ce qui s'explique probablement par la mise en commun des coûts comme la sécurité de chantier ou certains coûts de câblages et raccordements électriques. La deuxième est que pratiquement toutes les données recueillies proviennent d'installations sur des bâtiments existants, ce qui est cohérent avec la réalité.

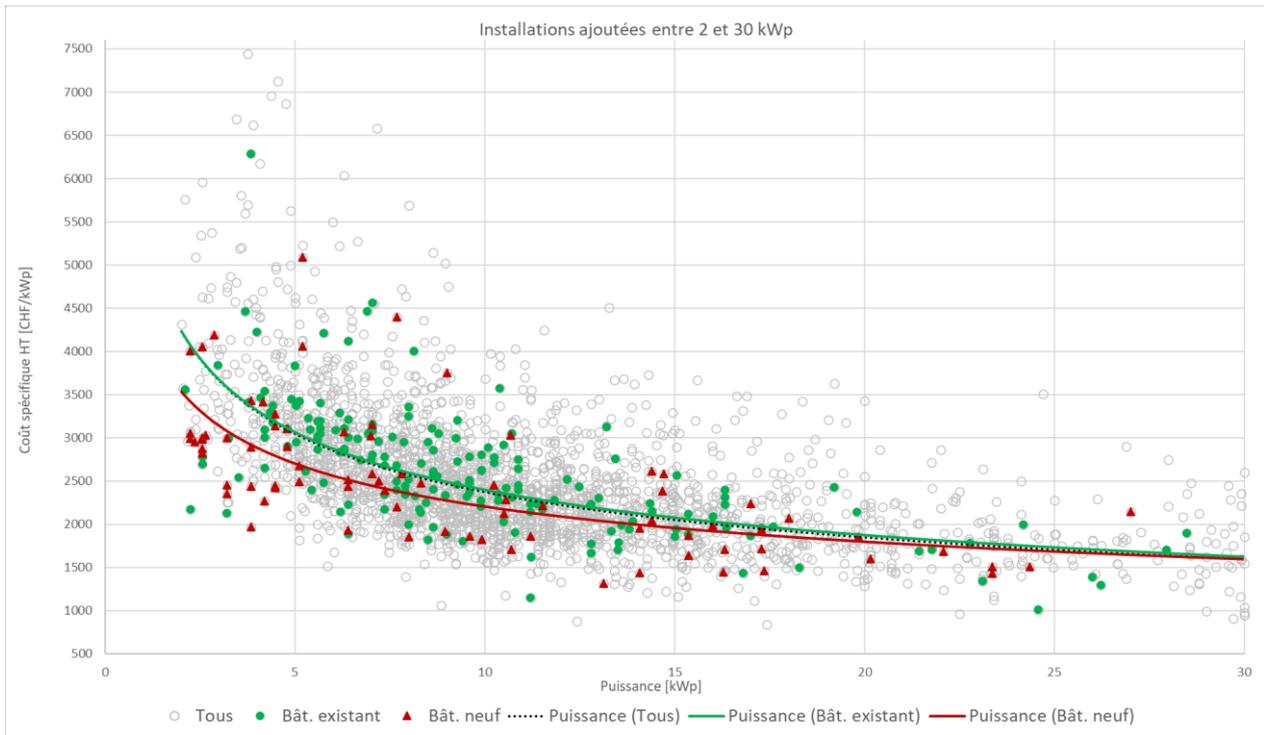


Figure 14 : Comparaison des coûts spécifiques entre les installations sur des bâtiments existants et des bâtiments neufs. Les ronds gris correspondent à l'ensemble des installations ajoutées, mettant en évidence celles sans informations quant au type de bâtiment. Courbes de tendance "puissance" selon Excel.

3.3.3 Comparaison si la sécurité de chantier est incluse ou non :

La Figure 15 montre la comparaison entre le prix des installations photovoltaïques avec et sans sécurité de chantier, les données sans informations étant également présentées. Sur l'ensemble des données pour lesquelles l'information est connue (56% des données collectées), 81% (1'594 sur 1'978) incluent la sécurité de chantier dans leurs prestations (ceci n'est pas visible à la Figure 6, car elle inclut également les installations intégrées). Cela semble être également le cas pour les données sans informations étant donné que les deux courbes de tendance (avec sécurité de chantier et tous les points) sont très proches. Concernant les installations sans sécurité de chantier (au nombre de 384), elles apparaissent environ 10% moins chères que l'ensemble des données pour les petites puissances, mais cet écart se réduit vers les moyennes puissances et semble petit pour les grandes puissances. Le résultat est totalement en accord avec la répartition des coûts (chapitre 5.1) qui évalue la part de la sécurité de chantier à 10% pour les petites installations et à 5% pour les grandes installations.

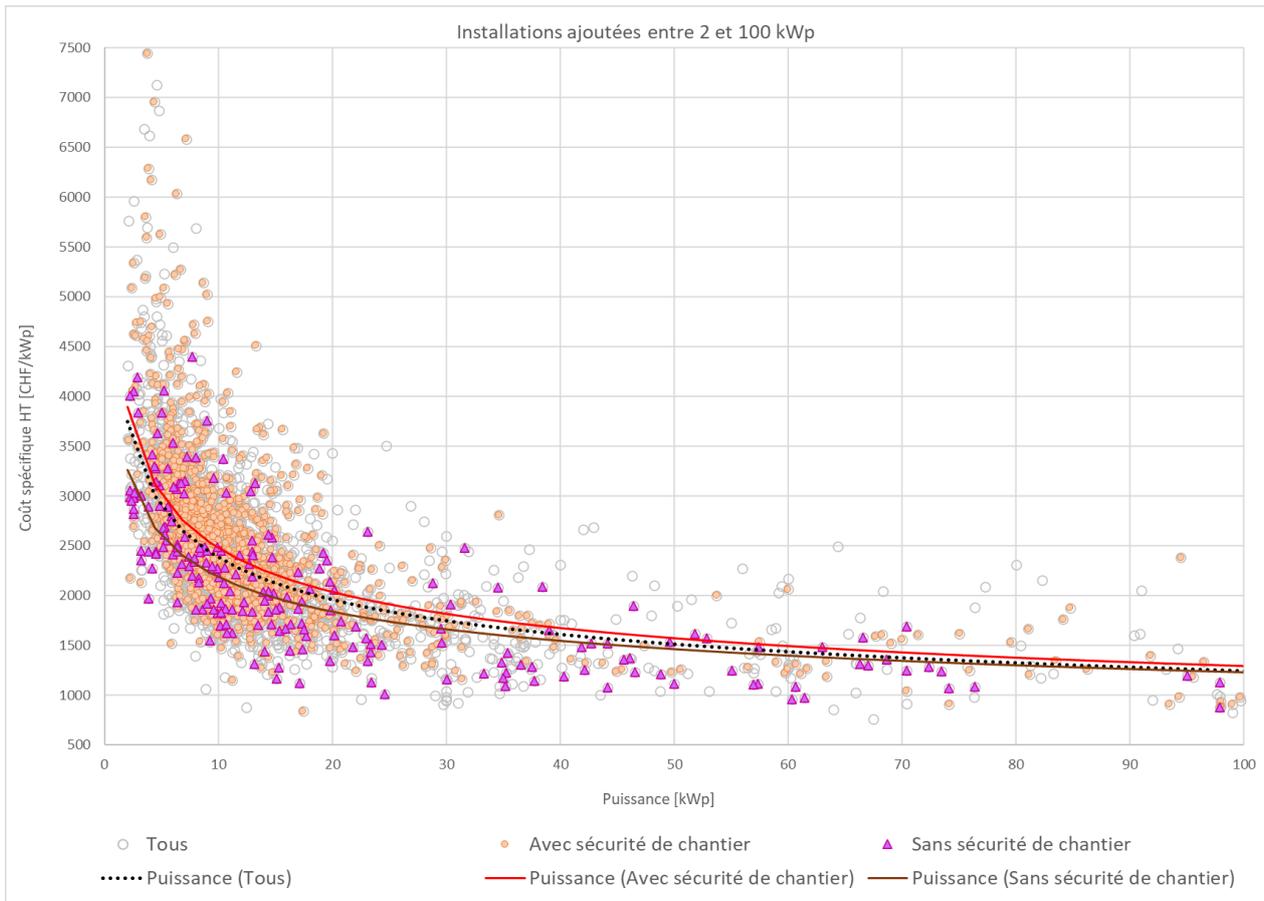


Figure 15 : Comparaison des coûts spécifiques entre les installations pour lesquelles la sécurité de chantier est incluse et celles pour lesquelles elle ne l'est pas. Les ronds gris correspondent à l'ensemble des installations ajoutées, mettant en évidence celles sans informations quant à la sécurité de chantier.

Les installations sur de nouveaux bâtiments sont fortement corrélées aux installations sans sécurité de chantier comme le montre la Figure 16 : 94% (74 sur 79) des installations <30 kWp sur nouveaux bâtiments n'ont pas la sécurité de chantier incluse, et ce taux passe à 100% pour les installations >30kWp. De plus on peut remarquer que leurs courbes de tendances sont très proches (Figure 14 et Figure 15).

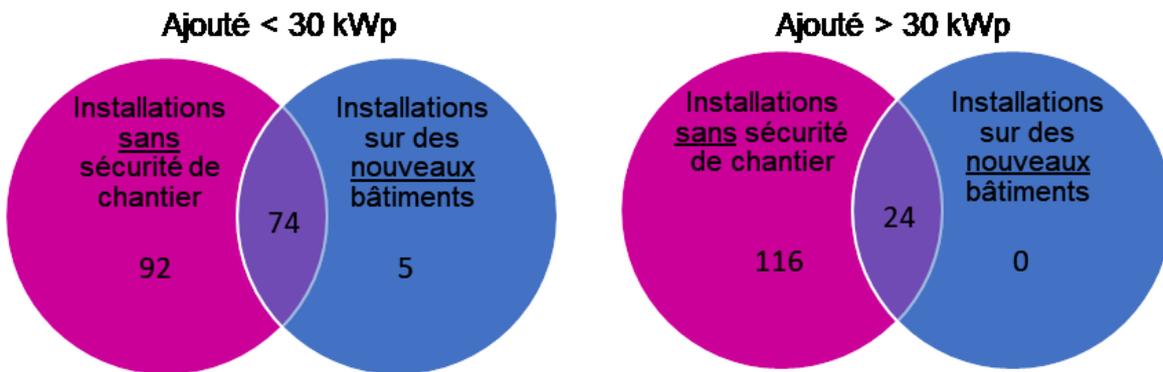


Figure 16 : Diagramme de Venn entre les installations sur de nouveaux bâtiments et celles sans sécurité de chantier.

Il existe probablement d'autres facteurs que l'absence de sécurité de chantier qui réduisent les coûts des installations sur de nouveaux bâtiments : par exemple une coordination pour la pose du gravier sur une toiture plate, la sécurité permanente non comprise dans la prestation photovoltaïque ou encore une conception architecturale intégrant une installation photovoltaïque (gaines techniques et cheminement des

câbles anticipés). A l'inverse, des coûts de coordination, de direction des travaux ou d'architecture, n'apparaissant que très partiellement dans la facture de l'installateur, sont à prévoir pour le bon déroulement du chantier

3.3.4 Comparaison des différents types d'onduleurs :

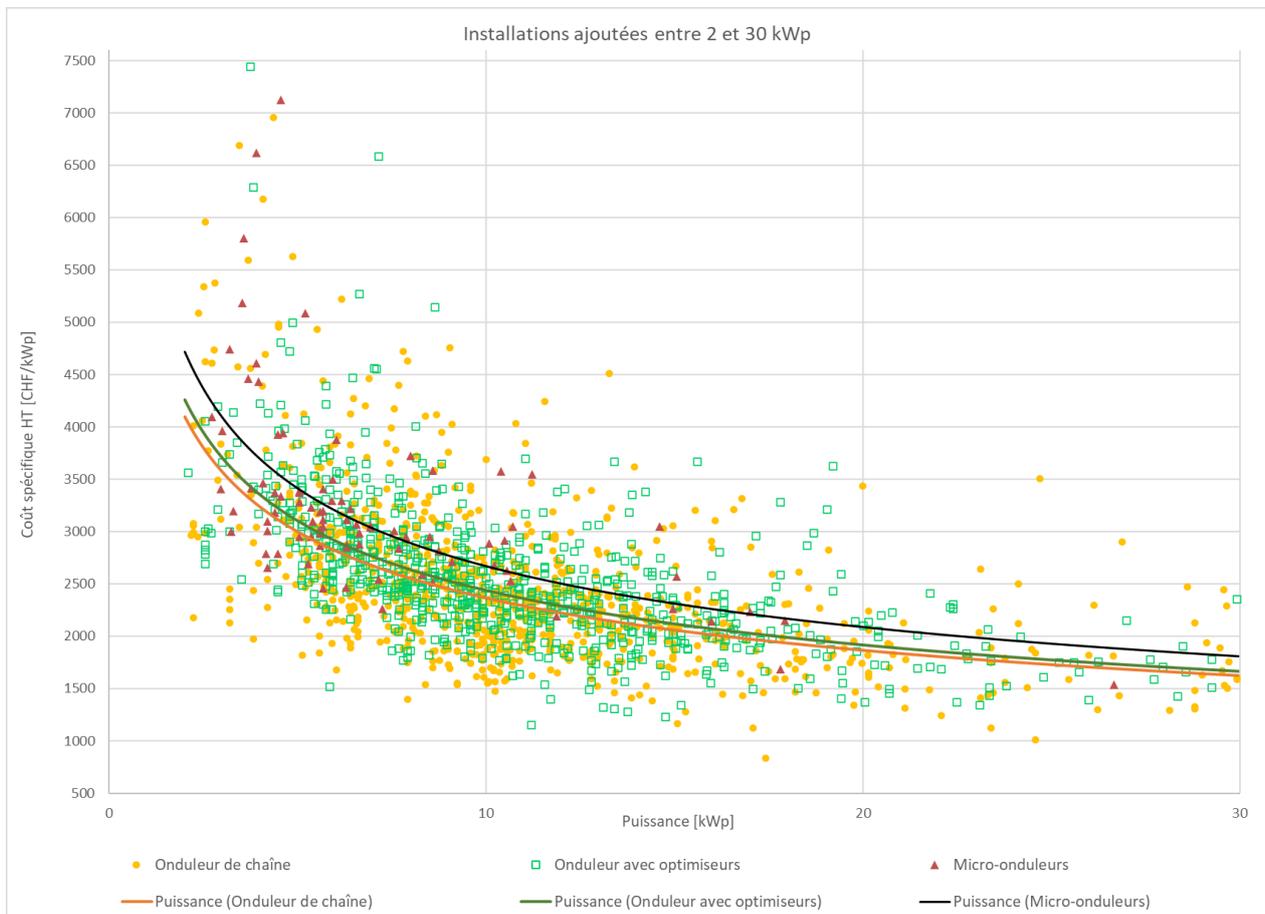
La Figure 17 montre la comparaison entre le prix des installations photovoltaïques selon le type d'onduleur(s) proposé pour les offres ou installé pour les factures.

Pour les micro-onduleurs, il y a 97 données dont une seule dans les puissances supérieures à 30 kWp (38 kWp), toutes les autres se situent uniquement dans la plage 2-30 kWp. Pour les optimiseurs il y a 924 données dans la plage 2-1200 kWp, mais le nuage de points s'arrête approximativement vers les 100 kWp. Les données pour des installations avec onduleur(s) de chaîne couvrent toute la plage de puissances.

Les 3 courbes de tendance sont très cohérentes sur la plage 2-30 kWp, avec un écart de prix quasi constant partout. Comparées aux installations avec onduleur(s) de chaîne, les installations avec micro-onduleurs sont environ 15% plus chères et celles avec optimiseurs sont 1 à 4% plus chères. Ces valeurs sont cohérentes avec l'observation 2019.

Au-delà de 30 kWp, la courbe de tendance pour les micro-onduleurs n'est plus pertinente. La courbe de tendance pour les installations avec optimiseurs est fiable jusqu'à environ 100 kWp, et présente également un surcoût de 1-4% pour les optimiseurs face aux onduleurs de chaîne.

Les données au-delà de 300 kWp montrent quelques installations avec optimiseurs nettement plus chères que celles avec onduleur(s) de chaîne. Cet écart au-delà de 300 kWp est peut-être le reflet d'un surcoût réel pour les installations avec optimiseurs pour les puissances moyennes et hautes, mais le nombre de données est insuffisant pour conclure sur ce point.



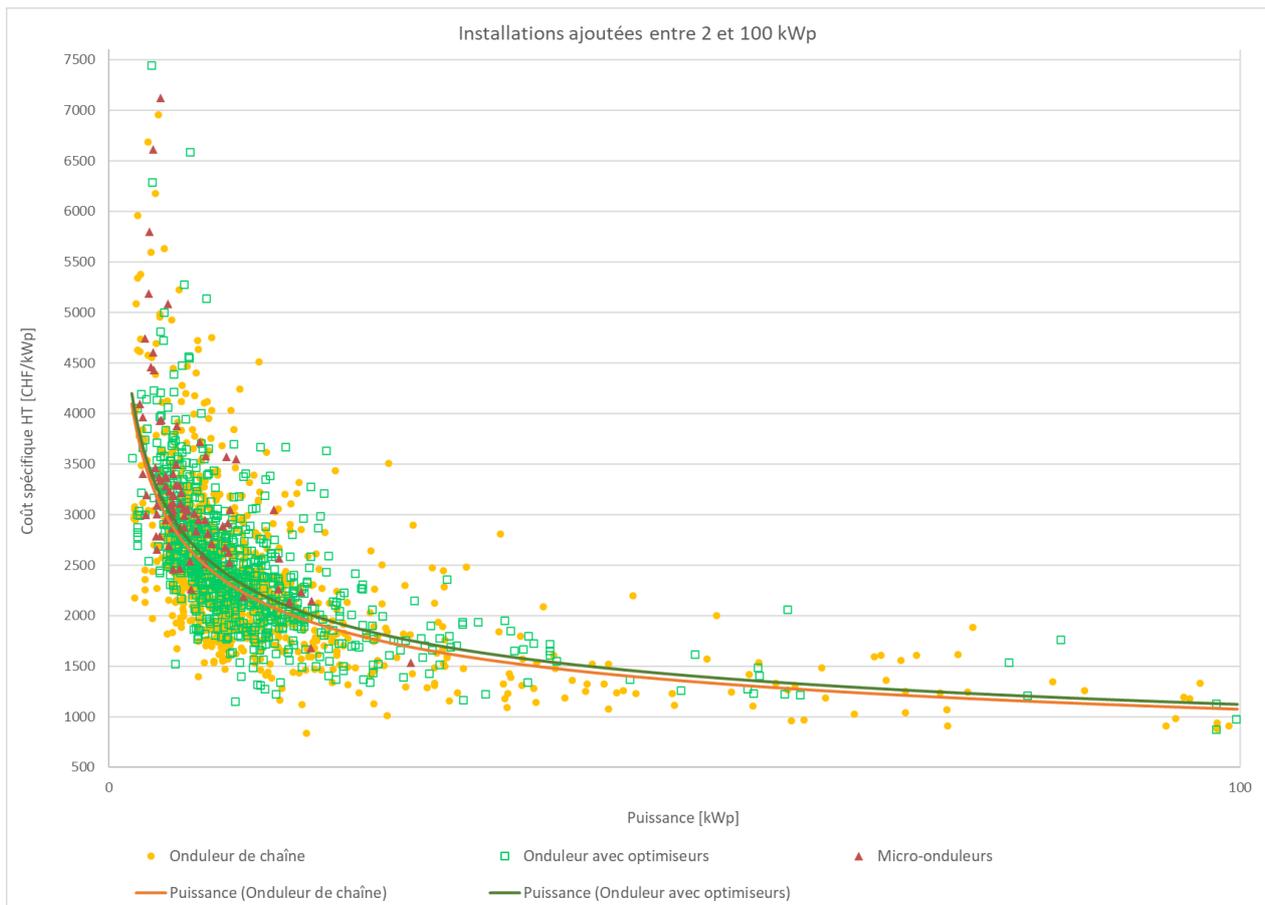


Figure 17 : Comparaison des coûts spécifiques des installations selon le type d'onduleur(s) proposé(s) (pour les offres) ou installé(s) (pour les factures). Les données pour les micro-onduleurs ne se situent que dans la plage des petites puissances. Courbes de tendance "puissance" selon Excel.

3.3.5 Comparaison des différents types de toitures :

Les Figure 18 et Figure 19 montrent la comparaison entre le prix des installations photovoltaïques selon le type de toiture. Ces graphiques présentent les données quand elles sont représentatives statistiquement, en l'occurrence les toitures inclinées en tuiles ne sont presque pas représentées au-dessus de 30 kWp (ce qui semble normal, car ce type de toiture est utilisé surtout pour les maisons individuelles), les toitures plates végétalisées et inclinées en tôles ne sont quasiment pas représentés sous 30 kWp.

Les données « inclinées sans détail » sont presque toutes situées sous 30 kWp et ne sont pas représentées sur ces graphiques, car elles n'apportent pas plus d'informations. Il est possible qu'elles soient majoritairement constituées d'inclinées en tuiles. Les données « plates sans détail » sont réparties sur toute la plage et ne permettent pas non plus d'identifier de tendance particulière, elles ne sont pas non plus placées sur ces graphiques. Les catégories « plate végétalisée », « à étanchéité nue » et « à graviers » sont assez fournies pour permettre des courbes de tendance.

Il n'y a pas assez de données sous 10 kWp pour déduire une tendance, mais entre 10 et 30 kWp on remarque que les installations sur toitures plates à étanchéité nue ont la même courbe de tendance que celles des toitures plates avec graviers et elles sont environ 15% moins chères que pour les toitures inclinées à tuiles. Le surcoût des toitures inclinées par rapport aux toitures plates s'explique par la facilité de mise en œuvre sur les toitures plates, comparées aux toitures inclinées en tuiles, le coût de main d'œuvre est donc plus faible, même si la structure pour toiture plate est légèrement plus chère.

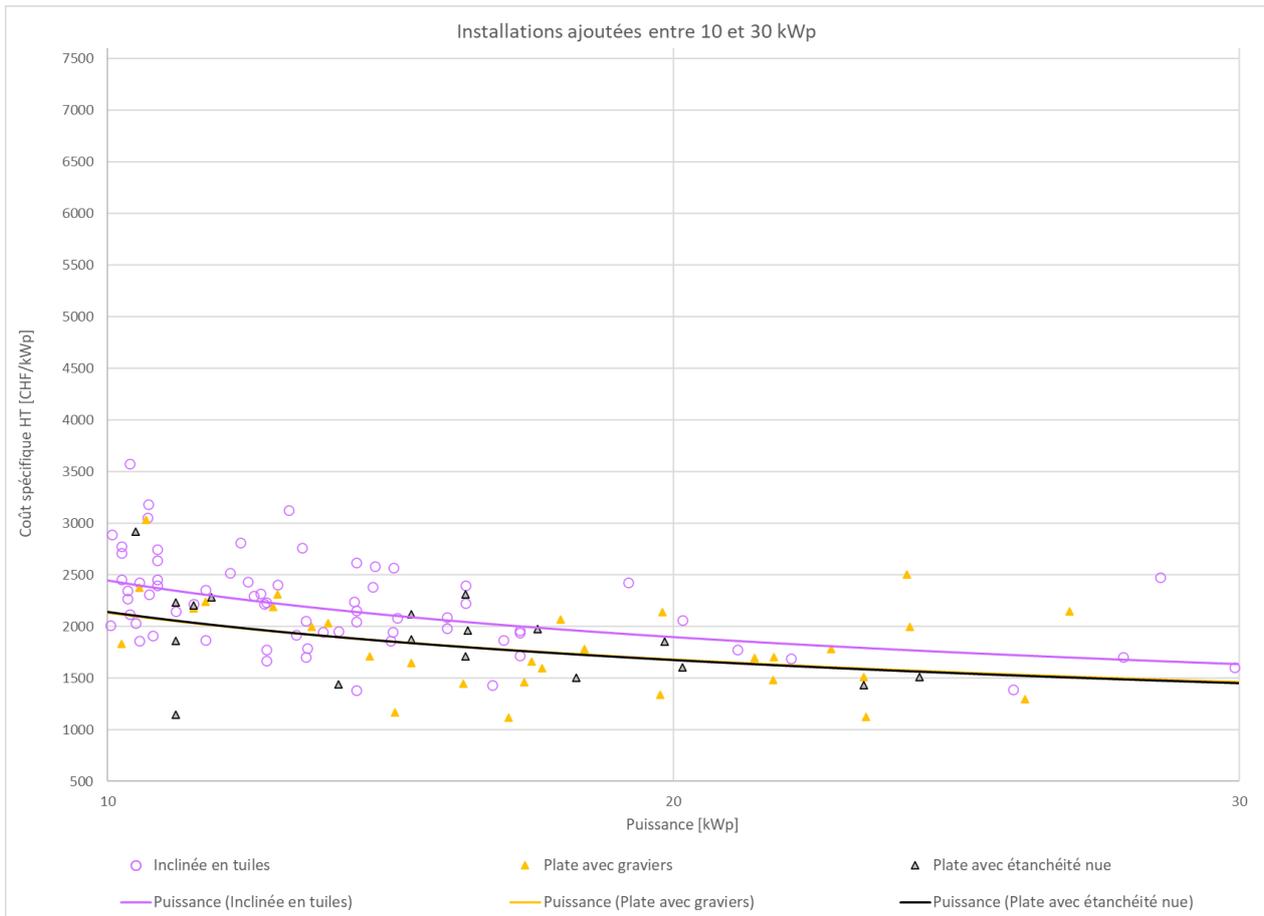


Figure 18 : Comparaison des coûts spécifiques des installations selon le type de toiture. Ce graphique montre les courbes de tendances sur la plage 10-30 kWp – les courbes jaune et noire sont confondues. Courbes de tendance "puissance" selon Excel.

Pour la plage 2-300 kWp (pas de données suffisantes et cohérentes au-delà), on découvre des courbes de tendance cohérentes pour les toitures inclinées en tôles, les toitures plates avec graviers, avec étanchéité nue et végétalisées. Les installations sur toitures inclinées en tôles sont les moins chères, et les écarts entre types de toiture diminuent avec la taille de l'installation.

En se basant sur les toitures en tôles comme référence :

- Les installations sur toitures plates avec étanchéité nue sont 3-8% plus chères,
- Celles sur toitures plates avec gravier 12-17% plus chères
- Et celles sur toitures plates végétalisées sont les plus chères avec 18-28% de surcoût par rapport aux toitures en tôles.

Les installations sur toitures en tôles sont les plus simples à mettre en œuvre et elles ont la structure la moins coûteuse, ce qui explique qu'elles soient les moins chères. Les toitures plates à étanchéité nue impliquent des structures plus coûteuses et la mise en place de lestage, d'où l'écart de prix avec les toitures en tôles. Les toitures plates à graviers nécessitent de déplacer ou souffler le gravier, et donc plus de main d'œuvre ou plus de sous-traitance, c'est probablement la raison du surcoût par rapport aux étanchéités nues. Enfin les toitures végétalisées impliquent souvent des structures particulières en adéquation avec la pousse de la végétation, qui sont plus chères que les systèmes standards, le déplacement ou soufflage du substrat végétal est également plus laborieux que pour le gravier, ce qui explique que les installations sur ces toitures sont les plus chères.

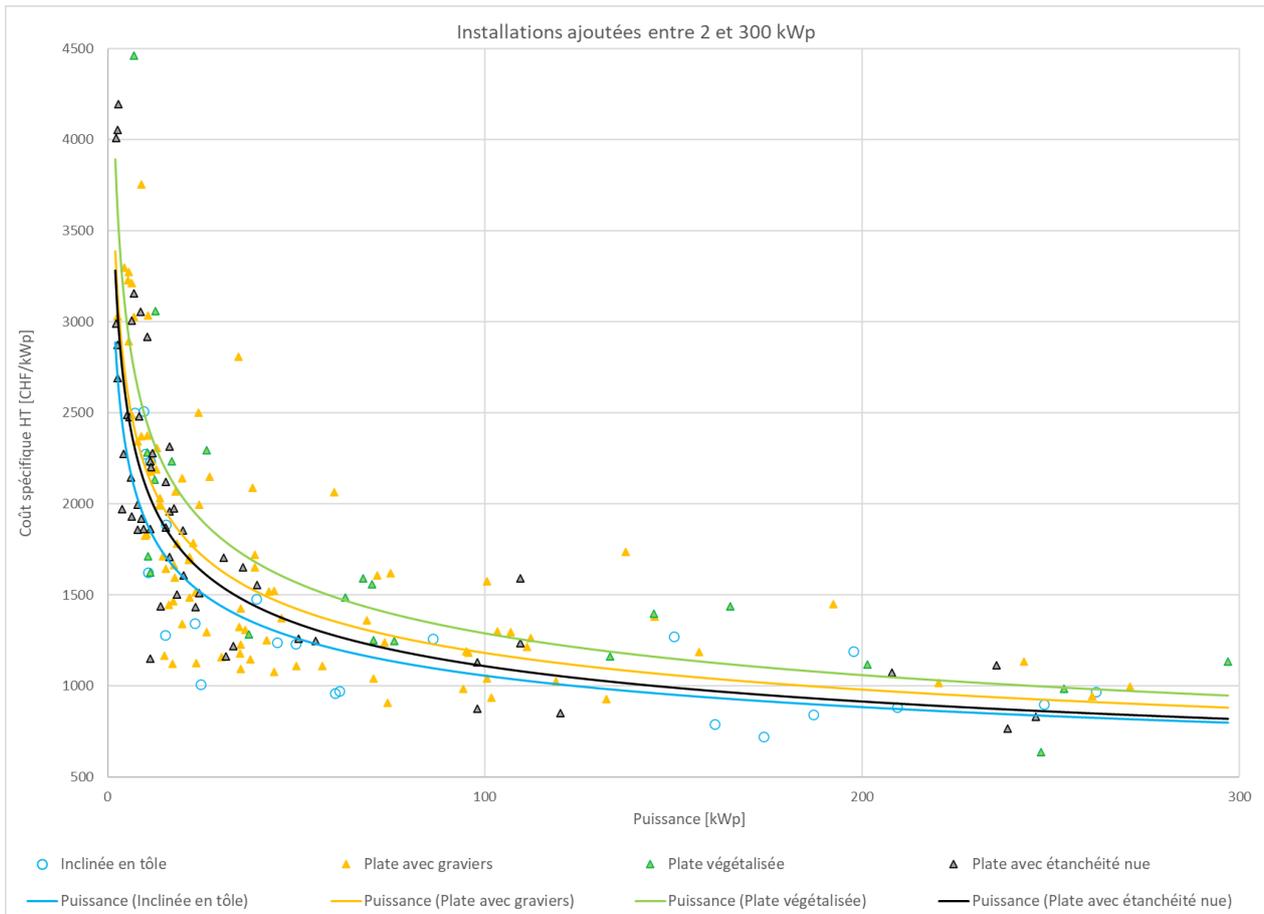


Figure 19 : Comparaison des coûts spécifiques des installations selon le type de toiture. Les données pour les toitures inclinées en tuiles se situent presque exclusivement dans la plage des petites puissances, cette courbe de tendance n'a donc pas été représentée dans le 3e graphique. Courbes de tendance "puissance" selon Excel.

3.3.6 Conclusion des diverses comparaisons

De nombreux facteurs influencent le prix des installations photovoltaïques. Il serait fastidieux de s'aventurer dans une analyse détaillée des coûts pour chaque combinaison différente des facteurs d'influence et rien ne garantit que cela apporterait des conclusions pertinentes. Il faut aussi considérer le nombre d'informations manquantes et la probabilité d'erreurs dans certaines données recueillies et ne pouvant être vérifiées. En fin de compte, la décision a été prise de conserver toutes les données pour créer un volume permettant aux écarts de se compenser statistiquement.

Pour la suite de l'étude, aucune donnée particulière n'a été écartée (hormis les installations intégrées) et toutes les caractéristiques suivantes avec leur influence font partie du volume des données utilisées pour l'analyse des prix du marché. Cela fait un total de 3'088 données incluant :

- Les offres non réalisées, avec la tendance à augmenter les prix.
- Les installations sur des bâtiments neufs, avec la tendance à diminuer les prix.
- Les installations sans sécurité de chantier, avec la tendance à diminuer les prix.
- Les installations avec une sécurité permanente, avec la tendance à augmenter les prix.
- Les installations avec du monitoring, avec la tendance à augmenter les prix.
- Les installations avec des micro-onduleurs, avec la tendance à augmenter les prix.
- Les installations sur des toitures inclinées en tôles, avec la tendance à diminuer les prix, et celles sur des toitures plates végétalisées, avec la tendance à augmenter les prix.
- De même, tous les autres paramètres, les différents types d'onduleurs et de toitures ont été conservés et mélangés dans la masse de données.

4. Résultats globaux

4.1 Courbe de référence

Les Figure 20, Figure 21 et Figure 22 présentent le coût spécifique hors taxes en fonction de la puissance des 3'088 installations ajoutées pour lesquelles les données ont été recueillies et analysées pour l'étude. Les points obtenus ont permis de déterminer une courbe de tendance de l'évolution du coût spécifique en fonction de la puissance.

Cette courbe de référence a été obtenue en utilisant la fonction `scipy.optimize.curve_fit` de Python qui permet de résoudre des problèmes non linéaires d'ajustement des courbes selon la méthode des moindres carrés. En testant plusieurs courbes de puissance et d'exponentielle, la meilleure représentation a pu être obtenue avec une combinaison des deux. La fonction puissance (négative) permet de décrire la très rapide décroissance du coût spécifique pour les petites installations tout en ralentissant la pente pour les installations de tailles moyennes. La fonction exponentielle permet de décrire l'évolution du coût spécifique pour les grandes installations avec une pente plus lente, mais sans qu'elle ne s'aplatisse trop. La constante reflète la limite théorique quand x tend vers l'infini.

Comme les données ne sont pas uniformément réparties sur toute la plage de puissance, une pondération a été attribuée aux données pour adapter leur poids dans l'ajustement de la courbe. Pour ce faire, le poids de chaque point a été défini inversement proportionnel à la racine carrée de la densité locale de ce point, la densité locale étant le nombre de points par unité de puissance autour du point considéré. Ainsi un point isolé a un poids fort comparé à un point situé dans un nuage de point dense, la racine carrée permet de contrebalancer des écarts de poids trop importants.

La fonction finale obtenue est la suivante :

$$y = \frac{5523}{x^{0.4862}} + 156.2 \cdot e^{-0.2321 \cdot x} + 578.4$$

Où

x est la puissance en kW_p ,

y est le coût spécifique en $CHF\ HT/kW_p$.

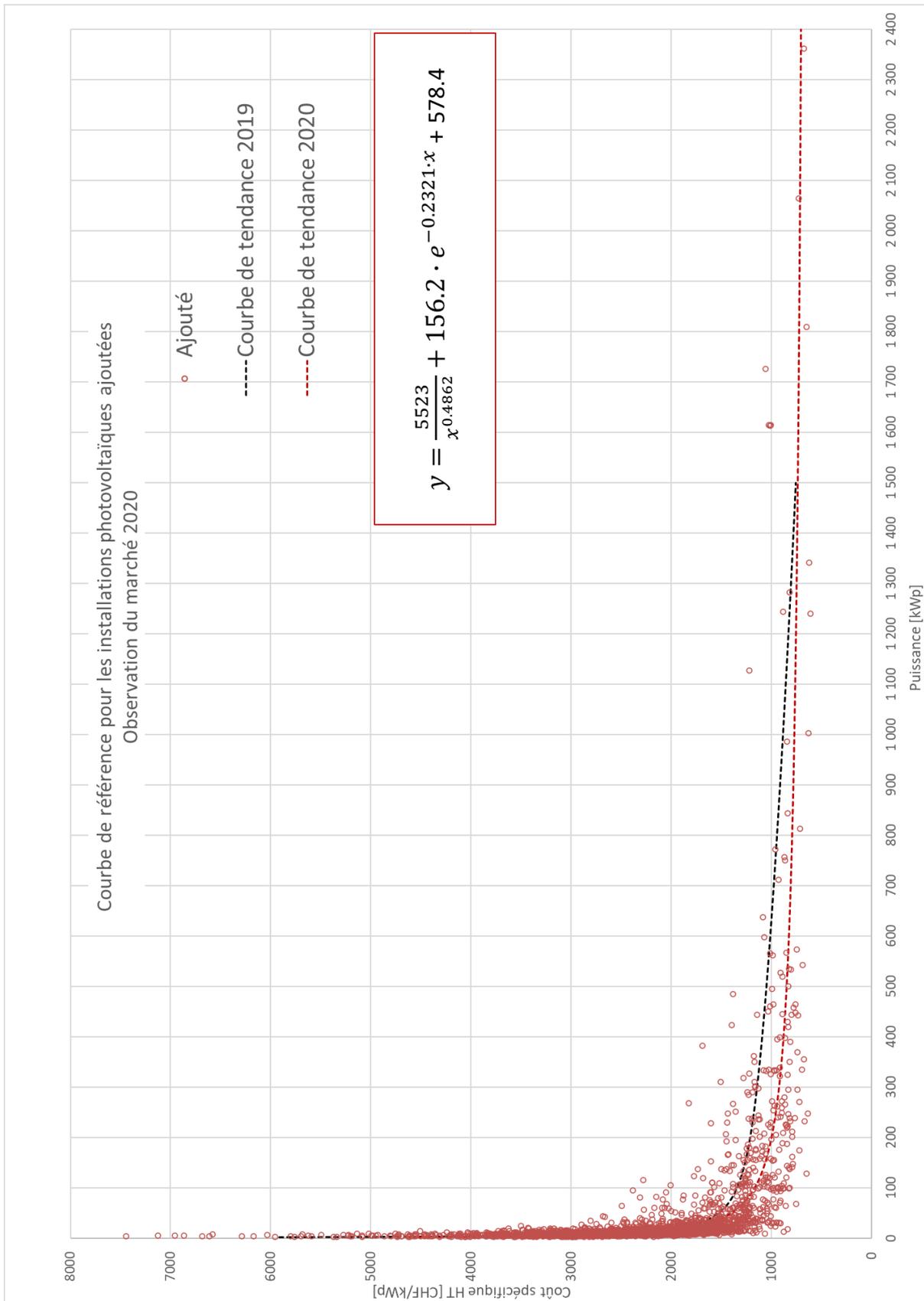


Figure 20 : Coût spécifique hors taxes des installations photovoltaïques ajoutées en fonction de la puissance avec la courbe de référence. Vue de l'ensemble de la page de puissance.

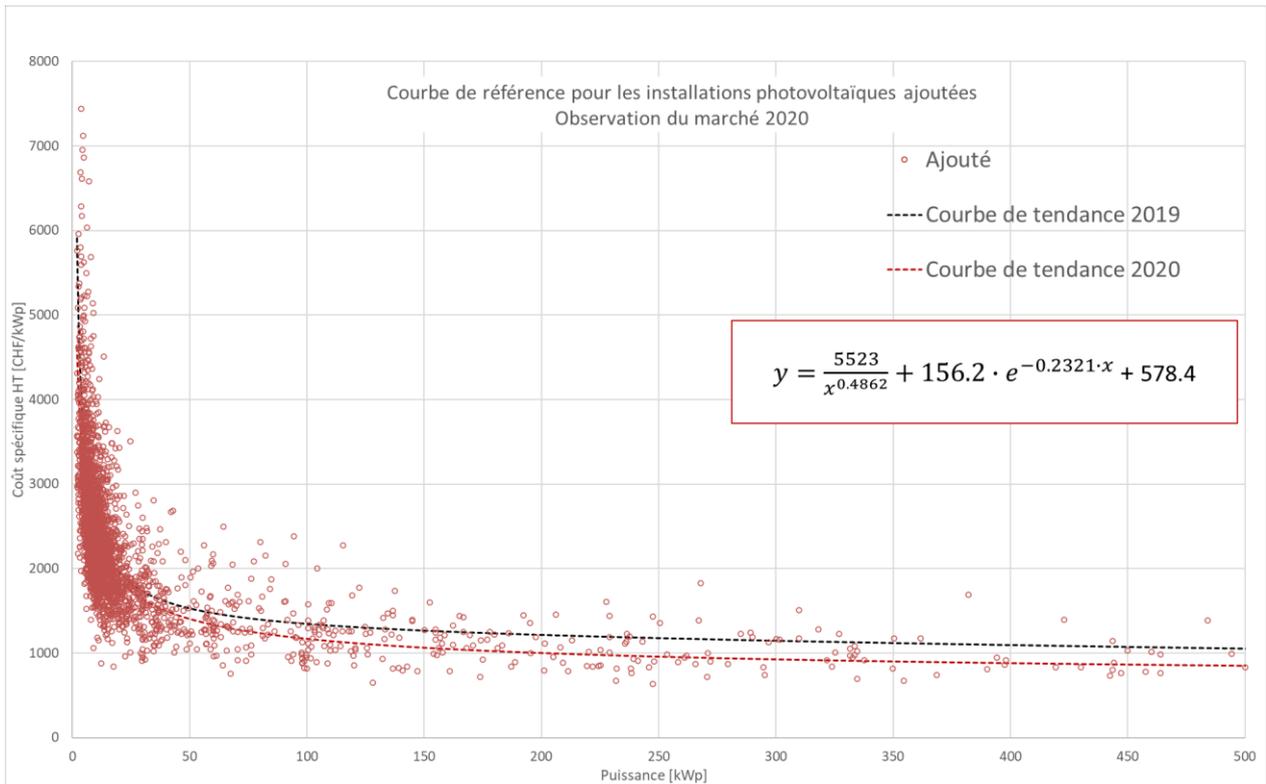


Figure 21 : Coût spécifique hors taxes des installations photovoltaïques ajoutées en fonction de la puissance avec la courbe de référence. Zoom sur la plage 2-500 kWp.

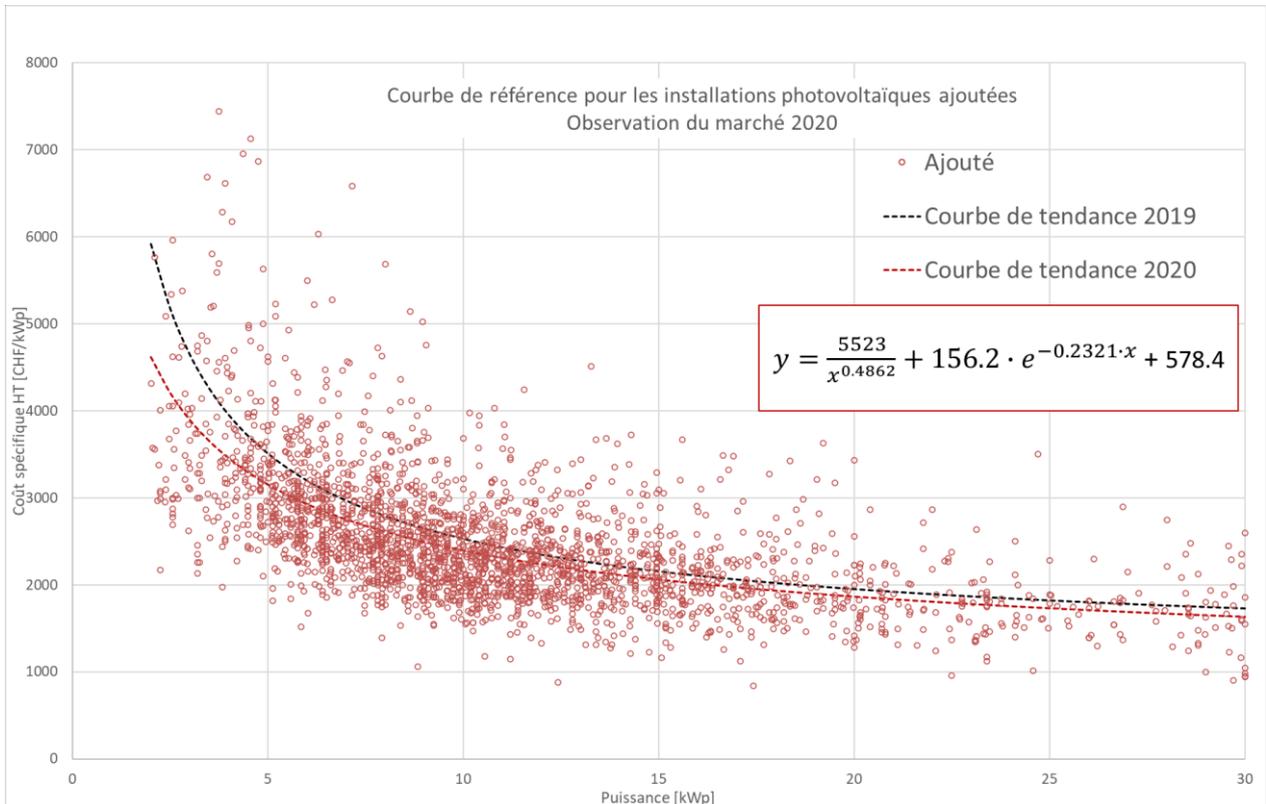


Figure 22 : Coût spécifique hors taxes des installations photovoltaïques ajoutées en fonction de la puissance avec la courbe de référence. Zoom sur la plage 2-30 kWp.

Courbe de référence simplifiée

Une manière plus simplifiée de représenter la répartition des données et la courbe de tendance est de faire l'étude du coût (et non pas du coût spécifique) en fonction de la puissance. Les résultats montrent une fonction affine, que nous avons séparée sur plusieurs plages de puissance pour suivre de manière plus cohérente le nuage de points.

Les paramètres des fonctions affines ont été obtenus avec l'outil « linéaire » Excel pour chaque plage de puissance :

Paramètres pour les courbes linéaires			
P min	P max	A	B
2	5	3'201.80	1'483.70
5	30	1'449.90	9'297.10
30	100	1'103.10	17'950.00
100	400	896.29	38'204.00
400	2'400	773.72	80'973.00

$$y = Ax + B$$

Tableau 1 : paramètres des fonctions affines pour la courbe de référence linéaire - Pmin et Pmax sont les puissances-bornes des plages, en kWp

La courbe noire ci-dessous est alors simplement le minimum (formule MIN sur Excel) des 5 courbes linéaires Ax+B données ci-dessus. Les jonctions entre courbes ne se font alors pas précisément aux bornes définies dans le Tableau 1.

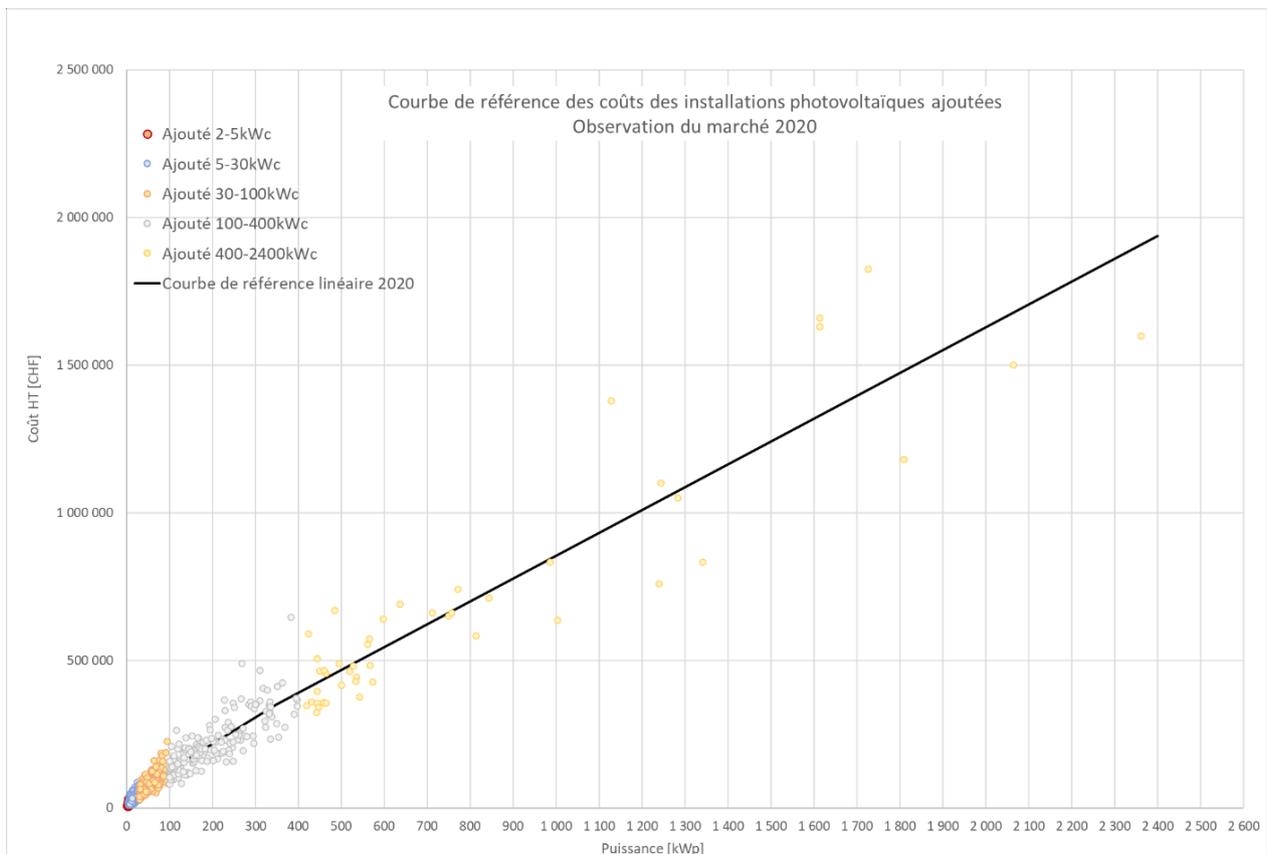


Figure 23 : coûts hors taxes selon la puissance, la courbe noire est le minimum (formule MIN sur Excel) des 5 courbes Ax+B dont les paramètres sont donnés ci-dessus.

Ce modèle linéaire présente une moins bonne précision sur les petites puissances, comparé au modèle « complexe » généré par Python. Il semble en revanche plus en accord avec les points situés vers les grandes puissances, mais le peu de données dans ces plages ne permet pas de le confirmer.

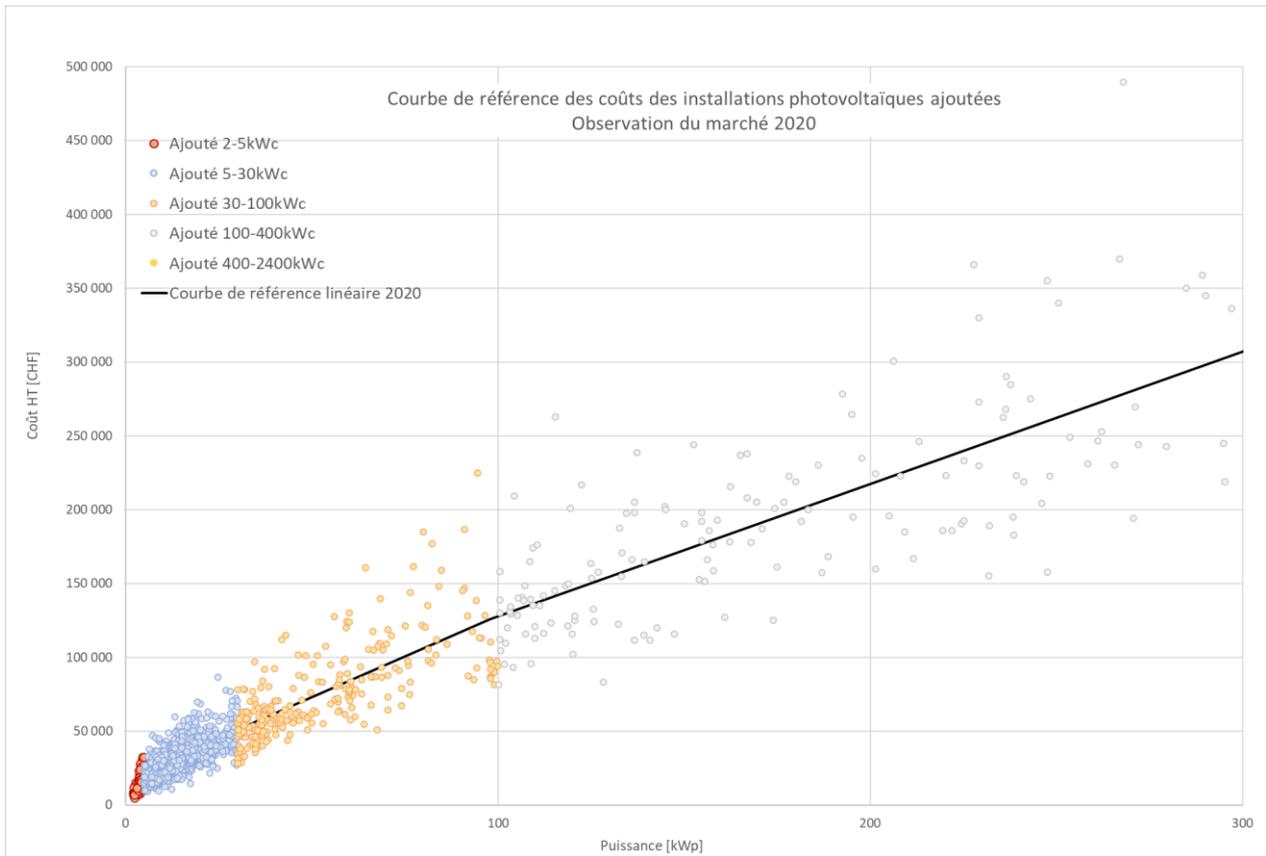


Figure 24 : coûts hors taxes selon la puissance, zoom sur la plage 2-300 kWp, la courbe noire est le minimum (formule MIN sur Excel) des 5 courbes Ax+B dont les paramètres sont donnés ci-dessus.

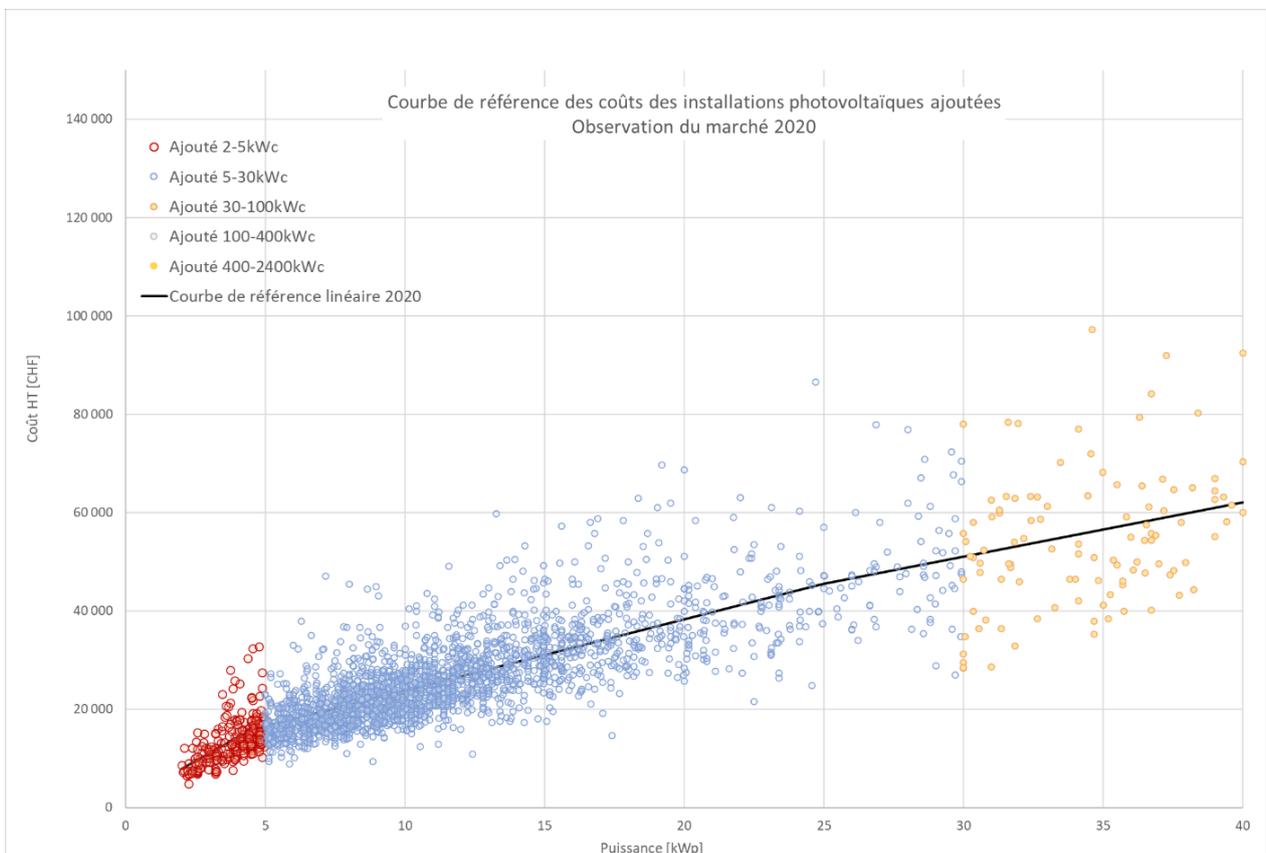


Figure 25 : coûts hors taxes selon la puissance, zoom sur la plage 2-40 kWp, la courbe noire est le minimum (formule MIN sur Excel) des 5 courbes Ax+B dont les paramètres sont donnés ci-dessus.

4.2 Répartition statistique du coût spécifique par plages de puissance

Le Tableau 2 et la Figure 26 présentent les résultats statistiques de l'étude sous forme de répartition statistique du coût spécifique pour différentes plages de puissance.

Sept différentes grandeurs ont été calculées et les cinq dernières sont illustrées à la Figure 26 :

- Le coût spécifique moyen correspond à la moyenne des coûts spécifiques de toutes les installations dans la plage de puissance concernée.
- Le coût moyen du kWp correspond à la somme des coûts des installations, divisée par la somme des puissances installées dans une même plage de puissance.
- Le min correspond au coût spécifique le plus bas dans la plage de puissance.
- Le 25% correspond au premier quartile, soit le coût spécifique pour lequel 25% des installations ont un prix inférieur et 75% ont un prix plus élevé dans la plage de puissance.
- La médiane correspond au coût spécifique pour lequel 50% des installations sont moins chères et 50% sont plus chères.
- Le 75% correspond au troisième quartile, soit le coût spécifique pour lequel 75% des installations ont un prix inférieur et 25% ont un prix plus élevé dans la plage de puissance.
- Le max correspond au coût spécifique le plus élevé dans la plage de puissance.

Plage de puissance	Nb d'installations	Coût spécifique moyen [CHF/kWp]	Coût moyen du kWp [CHF/kWp]	Min	25%	Médiane 2020	75%	Max
2-10	1'335	2'838	2'730	1'063	2'332	2'692	3'156	7'443
10-30	1'271	2'123	2'067	838	1'805	2'071	2'373	4'509
30-100	255	1'487	1'444	757	1'230	1'407	1'702	2'809
100-300	153	1'140	1'113	638	931	1'132	1'280	2'278
300-1'000	61	964	945	676	828	919	1'063	1'691
>1'000	13	843	837	613	643	819	1'019	1'223

Tableau 2 : Caractéristiques statistiques des installations photovoltaïques ajoutées de l'étude. Le paramètre analysé est le coût spécifique en CHF HT/kWp et les caractéristiques statistiques ont été calculées pour six plages de puissance indépendantes.

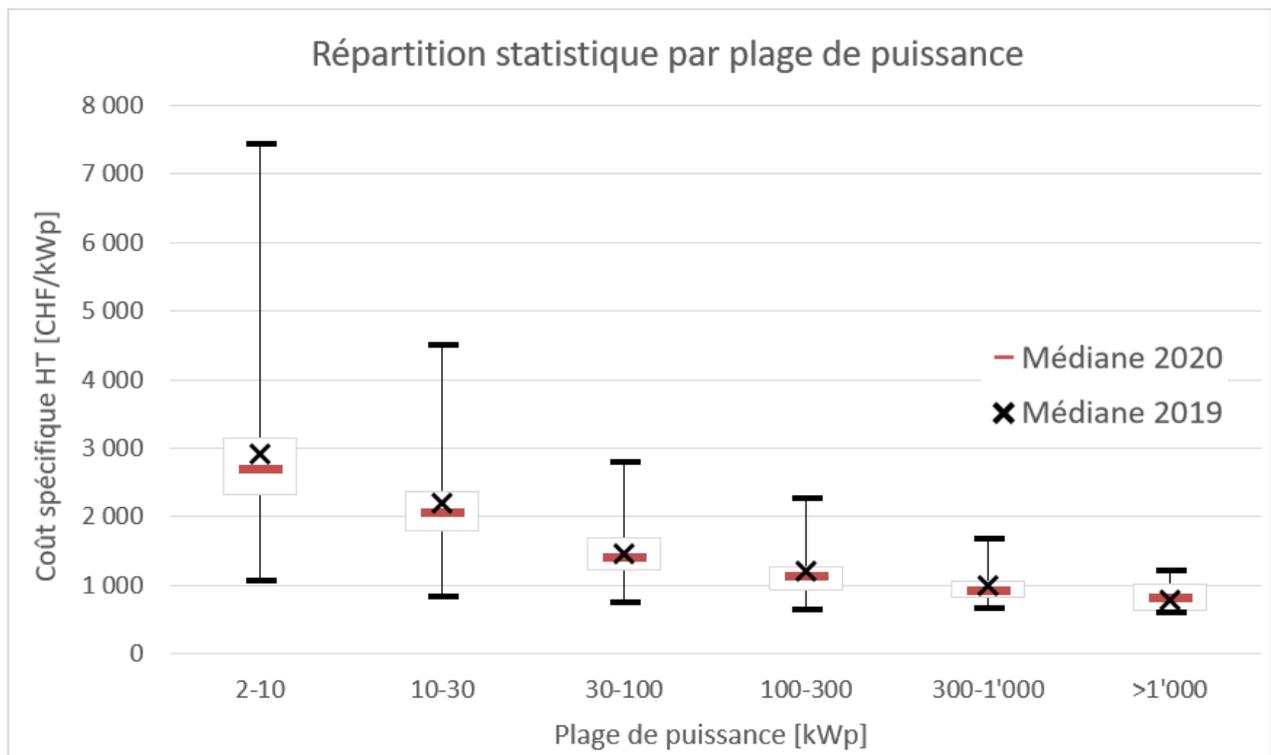


Figure 26 : Répartition statistique du coût spécifique en CHF HT/kWp des installations photovoltaïques ajoutées pour chaque plage de puissance. La barre rouge au centre correspond à la médiane des données 2020 dans la plage de puissance respective et la croix noire à la médiane 2019. Les deux barres noires aux extrémités correspondent aux coûts spécifiques minimum (min) et maximum (max) pour chaque plage. Le carré central entourant la médiane correspond à l'écart interquartile, c'est-à-dire que 50% des données de la plage de puissance se trouvent à l'intérieur du carré.

4.3 Discussion

La fonction `scipy.optimize.curve_fit` a eu une bonne convergence vers une solution représentative des données comme le montrent les Figure 20, Figure 21 et Figure 22. L'analyse de la courbe de référence montre une très forte décroissance du coût spécifique pour les très petites installations et une courbe presque plate pour les grandes installations. Le coût spécifique passe de 4'600 CHF/kWp à 2'400 CHF/kWp en seulement 8 unités de puissance dans l'intervalle 2-10 kWp. La décroissance diminue considérablement dès 10 kWp, pour passer juste sous la barre des 2'000 CHF/kWp à 16 kWp. Entre 50 kWp (1'400 CHF/kWp) et 100 kWp (1'200 CHF/kWp), la courbe se stabilise et la barre des 1'000 CHF/kWp est passée vers les 200 kWp.

Malgré une tendance générale claire, les données restent très dispersées. Par exemple en considérant une bande de +/- 20% autour de la courbe de référence, seuls 70% des données sont comprises dans cet intervalle. Ce constat est également visible à la Figure 26 puisqu'elle montre que 50% des données se situent à l'extérieur des carrés. Cela reflète principalement le grand nombre de paramètres qui influencent le coût d'une installation photovoltaïque. Le chapitre 3.3 présente plusieurs exemples d'influence des paramètres sur le coût spécifique des installations. Cette dispersion des coûts peut s'expliquer aussi par de grandes différences d'un chantier à un autre, avec certaines complexités qui peuvent apparaître ou non. La marge des installateurs peut également jouer un rôle, avec potentiellement une certaine disparité entre eux ou la volonté sur certains chantiers de gagner le marché malgré une marge infime et sur d'autres chantiers la liberté de bénéficier d'une marge plus confortable.

La comparaison avec la courbe de tendance 2019 montre une baisse de prix d'environ 5% sur les petites installations de 30 kWp et moins, d'environ 10% pour les installations d'environ 100 kWp et d'environ 15% pour les plus grandes installations. Cet écart est probablement lié à la baisse du coût du matériel, en particulier des modules, qui impacte donc d'autant plus le coût des installations que la puissance est grande. Cette comparaison 2019/2020 n'est plus pertinente à partir de 600 kWp environ, car les données 2019 étaient moins nombreuses que celles de 2020 pour les grandes puissances, la courbe de tendance 2019 est en effet peu précise et présente une pente trop importante à partir de 600 kWp par rapport à la courbe de tendance 2020.

5. Répartition des coûts

Une analyse de répartition des coûts a été réalisée sur les installations photovoltaïques ajoutées pour lesquelles le détail des coûts était connu, soit 460 installations. Cette analyse s'intéresse à la part des coûts des différents composants dans le coût global du système. Les données ont été divisées dans les mêmes plages de puissance qu'au chapitre 4.2, car les différences sont grandes selon la taille de l'installation photovoltaïque.

5.1 Aperçu global

Dans une première analyse, le coût global a été réparti en 6 catégories permettant d'inclure les données du CDS, pour lesquelles seuls ces détails sont connus. Il s'agit :

- Du coût des modules
- Du coût des onduleurs
- Du coût de la structure
- Du coût de la sécurité de chantier
- Des coûts administratifs et de planification
- Des autres coûts

L'analyse comprend les nombres suivants de données par plage de puissance :

2-10 kWp	10-30 kWp	30-100 kWp	100-300 kWp	300-1000 kWp	>1000 kWp
245	306	29	22	5	0

Ces données sont celles où les 6 catégories sont renseignées et non nulles, ce qui réduit le nombre de données totales étudiées, en particulier pour la plage 300-1000 kWp. En acceptant par exemple les données où le coût de la sécurité de chantier est nul, le nombre de données disponibles double environ (et passe même à 30 pour la plage 300-1000 kWp). Comme les résultats finaux sont très proches quelles que soient les données observées, nous avons choisi de ne présenter que les données pour lesquelles toutes les catégories ont un coût.

Les résultats sont présentés à la Figure 27. Celle-ci montre clairement l'augmentation de la proportion du coût des modules relativement au coût global de l'installation en fonction de la puissance ; plus l'installation est grande, plus les modules prennent une part importante du coût global, allant de 17% à 39% du coût global.

La proportion du coût des onduleurs reste assez stable, toujours autour de 8%, sauf pour la plage 2-10 kWp. Ce constat indique que le coût spécifique des onduleurs diminue proportionnellement au coût spécifique global.

Tous les autres coûts décroissent en proportion du coût global au fur et à mesure que l'installation photovoltaïque augmente en taille.

Le coût spécifique de la structure reste stable pour les installations en dessous de 30 kWp, soit 260-280 CHF/kWp (son pourcentage augmente donc entre les deux premières plages). Ce résultat montre que pour les petites installations le coût de la structure reste proportionnel à la puissance et n'est pas réduit avec de plus grandes tailles. Au-delà de 30 kWp, le pourcentage du coût spécifique de la structure reste très stable jusqu'à 100 kWp, à 12%, puis décroît lentement jusqu'à 8%.

La part des coûts de la sécurité de chantier et des coûts administratifs/planifications diminue, mais reste relativement stable, de 8-9% à 5% du coût global, ces coûts ne sont pas du tout une constante fixe et sont au contraire proportionnels au coût global. A noter tout de même que le résultat pour les coûts administratif et planification est à considérer prudemment, car les moyennes des coûts spécifiques pour les plages de puissance 2-10 kWp et 10-30 kWp sont largement dominées par les données du CDS, et il est possible que le service CDS ne prenne pas en compte dans ces coûts certaines prestations qui sont considérées dans les autres données.

Globalement ces résultats sont très cohérents avec ceux obtenus sur l'observation 2019.

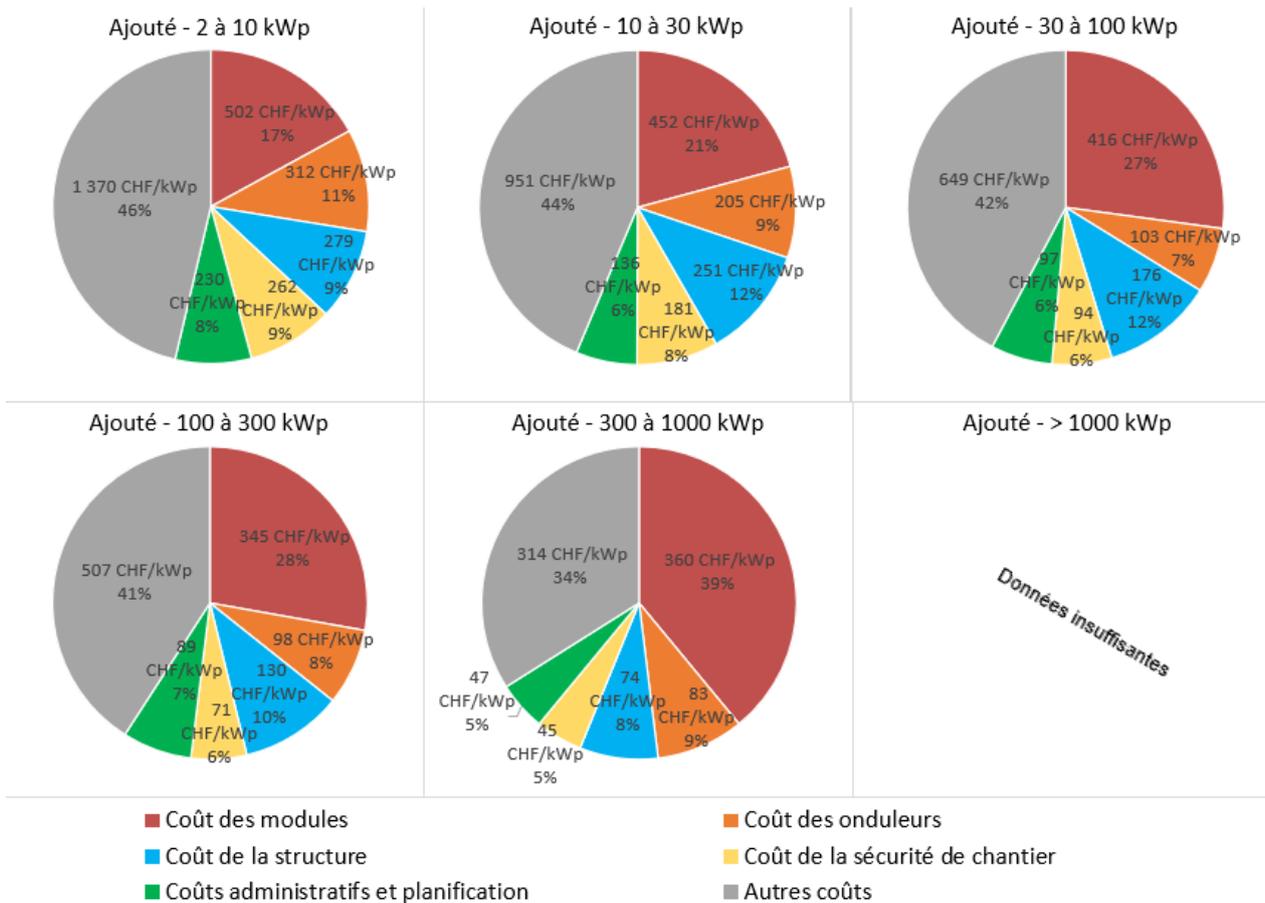


Figure 27 : Répartition des coûts des installations photovoltaïques ajoutées, divisés en six catégories principales. Les valeurs correspondent aux moyennes des coûts spécifiques des catégories pour toutes les installations d'une plage de puissance où ce détail est connu.

5.2 Aperçu détaillé

Avec les données du chapitre précédent, la part des « autres coûts » non définis est grande et ne permet pas une analyse complète des coûts. Le présent chapitre se concentre désormais sur 86 installations photovoltaïques ajoutées pour lesquelles un détail complet a pu être fourni. Dans cette analyse le coût global a été réparti en 9 catégories en identifiant dans les « autres coûts » les coûts de la main-d'œuvre, du matériel électrique et de la logistique et du transport. Les coûts de la sécurité permanente ont également été identifiés, mais regroupés avec les coûts de la sécurité de chantier.

Les 9 catégories sont les suivantes :

- Coût des modules
- Coût des onduleurs
- Coût de la structure
- Coût de la sécurité de chantier et permanente
- Coûts administratifs et de planification
- Coût de la main d'œuvre
- Coût du matériel électrique
- Coût de la logistique du transport
- Autres coûts

L'analyse comprend les nombres suivants de données par plage de puissance :

2-10 kWp	10-30 kWp	30-100 kWp	100-300 kWp	300-1000 kWp	>1000 kWp
13	22	20	26	5	0

La Figure 28 montre une répartition détaillée des coûts des installations photovoltaïques. Les données sont toutefois moins fiables compte tenu d'une plus petite quantité de données. Cependant, elles sont

exemptes des données du CDS et respectent une certaine homogénéité basée sur les critères définis pour l'étude. On note ainsi quelques divergences avec la Figure 27.

Une première comparaison entre les Figure 27 et Figure 28 a été réalisée. Le coût des modules et son évolution changent peu, même si les valeurs sont légèrement différentes. L'évolution du coût de la structure est également similaire, on retrouve la faible variation du coût entre 2 plages qui implique une augmentation de la part sur le coût global, mais cette faible variation est décalée par rapport à la Figure 27. On peut déduire qu'il y a, sur la plage 2-100 kWp, une limite vers laquelle le coût de la structure se stabilise et prend une part plus importante du coût global, ceci est peut-être dû à une transition entre le nombre d'installations sur toitures inclinées et celles sur toitures plates, ces dernières étant légèrement plus chères. On remarque également que les coûts des onduleurs et les coûts administratif/planification présentent des profils différents que sur la Figure 27. Pour les coûts administratifs et de planification, cela peut facilement s'expliquer avec des prestations qui ne sont pas comptabilisées dans cette catégorie par le service CDS, mais qui le sont dans cette étude (voir chapitre 5.1). Au niveau des onduleurs, il est plus difficile d'expliquer la différence, il est possible que le coût des optimiseurs ait été omis dans certains cas. Avec cette nouvelle analyse, le pourcentage du coût des onduleurs par rapport au coût global est décroissant à l'inverse d'être stables dans l'analyse précédente. Cela semble plus cohérent et montre que les onduleurs ont moins d'impact sur le coût global pour les grandes installations que pour les petites, mais l'impact est stable entre les moyennes et les grandes installations. Avec des coûts administratifs et de planification plus élevés au niveau des petites installations, son pourcentage par rapport au coût global montre une décroissance plus prononcée. Ces coûts auraient donc bien un impact plus prononcé pour les toutes petites installations. Au-delà de 30 kWp toutefois, l'impact financier ne décroît pas de manière significative. Le coût de la sécurité a logiquement augmenté puisque la sécurité permanente y a été ajoutée. Cela a uniquement un impact pour les grandes installations. En analysant le détail, il semble que le coût spécifique de sécurité permanente (et pas juste son pourcentage au coût global) augmente avec la taille de l'installation. Mais avec le faible nombre de données, il n'est pas possible d'affirmer ce résultat, bien que l'observation 2019 observait la même tendance.

Cette analyse a permis de détailler le poste « autres coûts » du chapitre 5.1. Le coût de la main-d'œuvre est la part la plus élevée, et il représente un quart du coût global pour toutes les plages de puissance, contrairement aux données 2019 qui montraient un impact plus faible plus la puissance était grande. Les autres catégories sont le coût du matériel électrique et les coûts de la logistique et du transport. Le premier a un impact stable d'environ 10% du coût global sur les installations sous 300 kWp, qui semble diminuer pour les plus grandes puissances, mais le peu de données sur cette plage met en doute cette affirmation. Les coûts de la logistique et du transport ont un impact très faible, environ 3% du coût global, et qui n'évolue pas. Finalement la catégorie « autres coûts » restants a pu être réduite au minimum et consiste majoritairement en coûts de monitoring.

En résumé, on constate que le coût des modules et le coût de la main-d'œuvre sont les facteurs les plus influents sur le prix. Ensemble ils totalisent la moitié des coûts. La main-d'œuvre donne les plus grandes économies d'échelle.

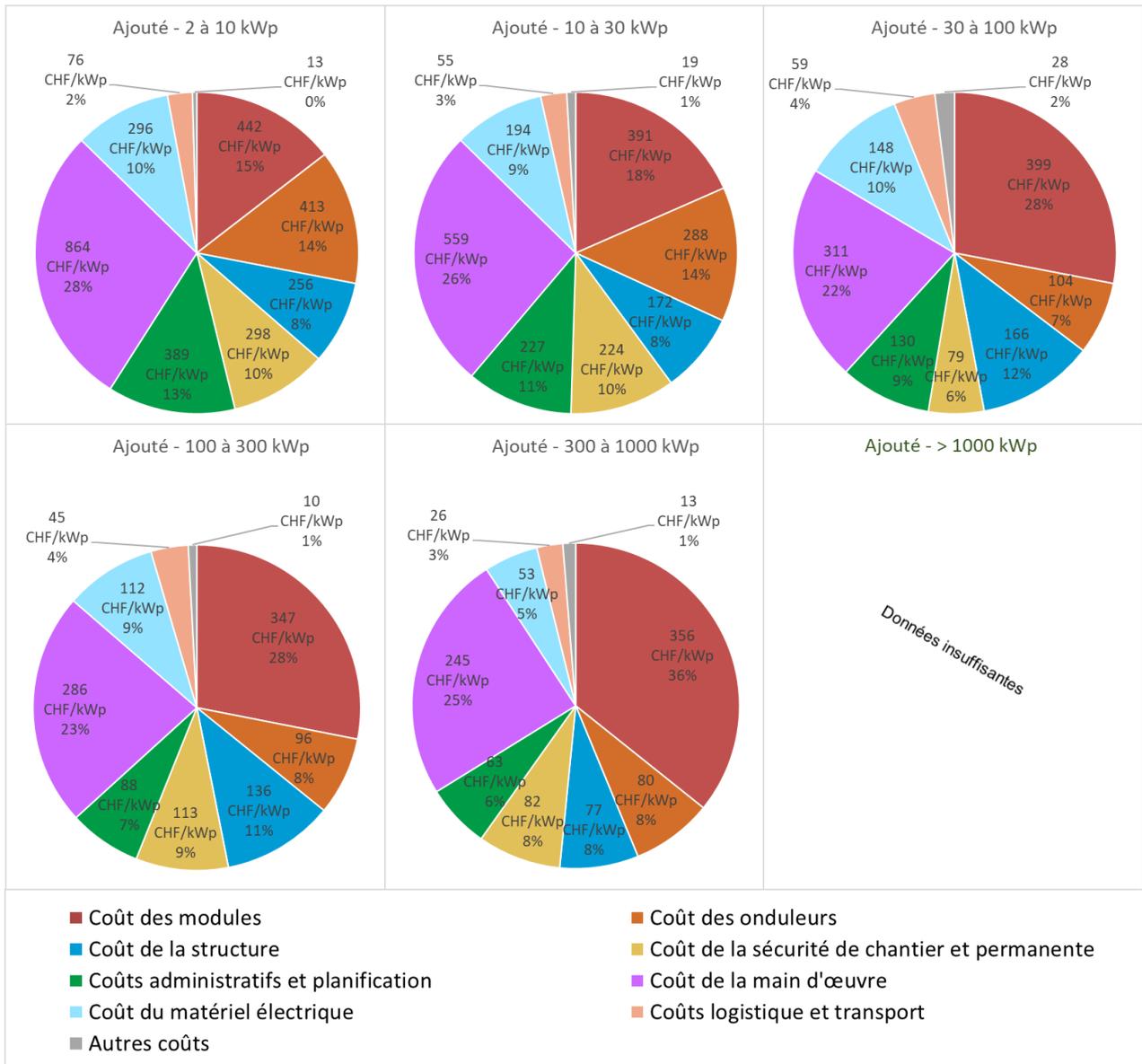


Figure 28 : Répartition détaillée des coûts des installations photovoltaïques ajoutées, divisés en neuf catégories. Les valeurs correspondent aux moyennes des coûts spécifiques des catégories pour toutes les installations d'une plage de puissance où ce détail est connu.

6. Evolution dans le temps

Pour chaque donnée recueillie, la date d'établissement de l'offre ou de la facture a été fournie. L'analyse suivante évalue l'évolution des coûts entre 2018, 2019, 2020 et entre les semestres 1 et 2 de 2020.

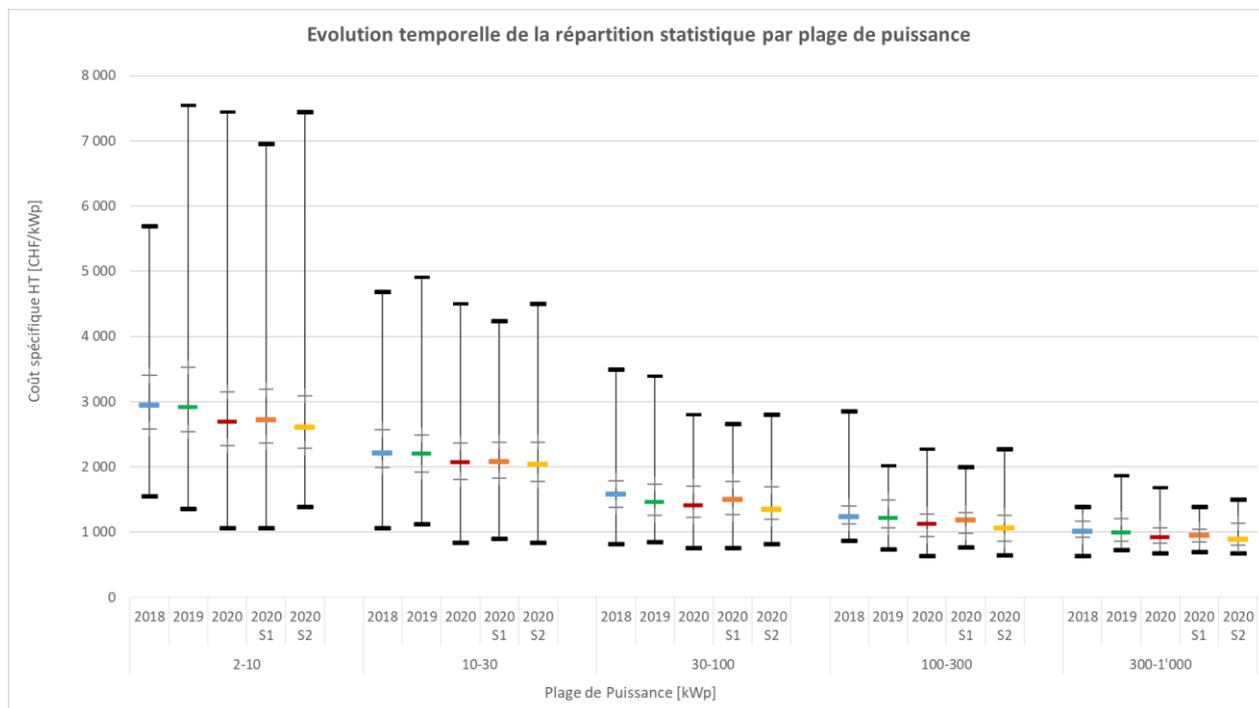


Figure 29 : Evolution de la répartition statistique du coût spécifique en CHF HT/kWp des installations photovoltaïques ajoutées pour chaque plage de puissance. Cinq plages de puissance sont représentées, avec pour chaque plage les données 2018, 2019, 2020, semestre 1 de 2020 et semestre 2 de 2020. Les traits centraux colorés correspondent aux médianes. Les bouts des verticales donnent les coûts spécifiques maximums et minimums de chaque catégorie. Les traits intermédiaires plus fins correspondent aux premiers et aux troisièmes quartiles (25% et 75%).

Les Figure 29, Figure 30 et Figure 31 mettent en évidence sous différentes manières l'évolution temporelle du coût spécifique des installations photovoltaïques ajoutées analysées pour l'étude. La Figure 29 reprend les mêmes caractéristiques statistiques que celles présentées au chapitre 4.2. Les valeurs représentées à la Figure 30 sont basées sur les mêmes critères et la même analyse qu'au chapitre 5.1. Les données du CDS font donc parties de cette analyse. A la Figure 31, les deux courbes montrent clairement un léger écart entre les données du semestre 1 et celles du semestre 2 sur toute la plage de puissance. Toutes les analyses donnent le même résultat : le coût du photovoltaïque a baissé en 2020 par rapport à 2019, et il a de plus baissé entre le 1^{er} et le 2^e semestre 2020. La Figure 29 montre que les coûts du semestre 1 de 2020 sont plus bas que ceux de 2019, sauf pour la plage 30-100 kWp où ils sont quasiment égaux. On peut supposer que la situation Covid a légèrement freiné la baisse de prix du début d'année, mais pas assez pour entraîner une stabilisation du prix par rapport à 2019.

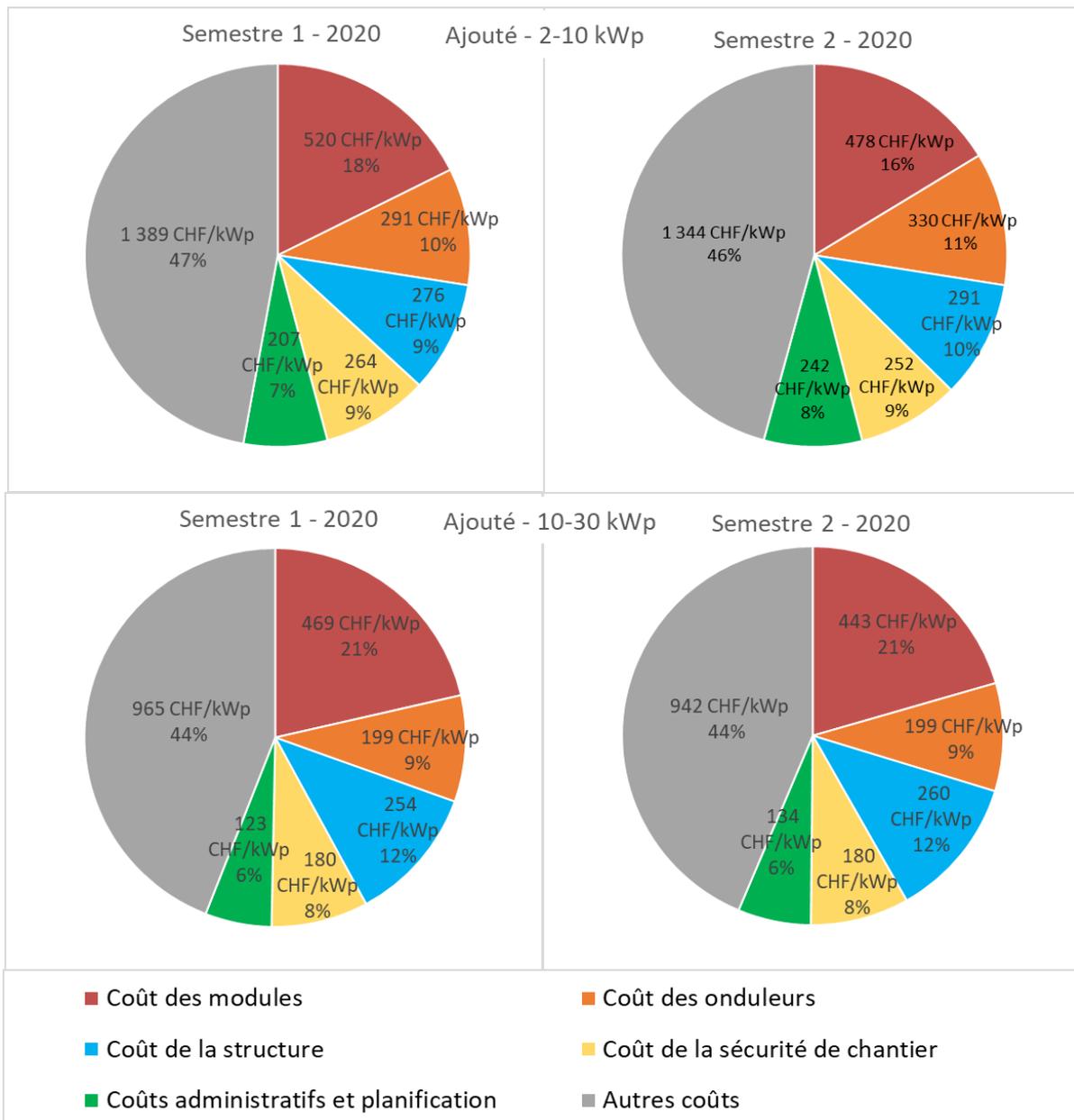


Figure 30 : Evolution de la répartition des coûts entre le semestre 1 et le semestre 2 2020 pour les plages de puissance 2-10 kWp et 10-30 kWp.

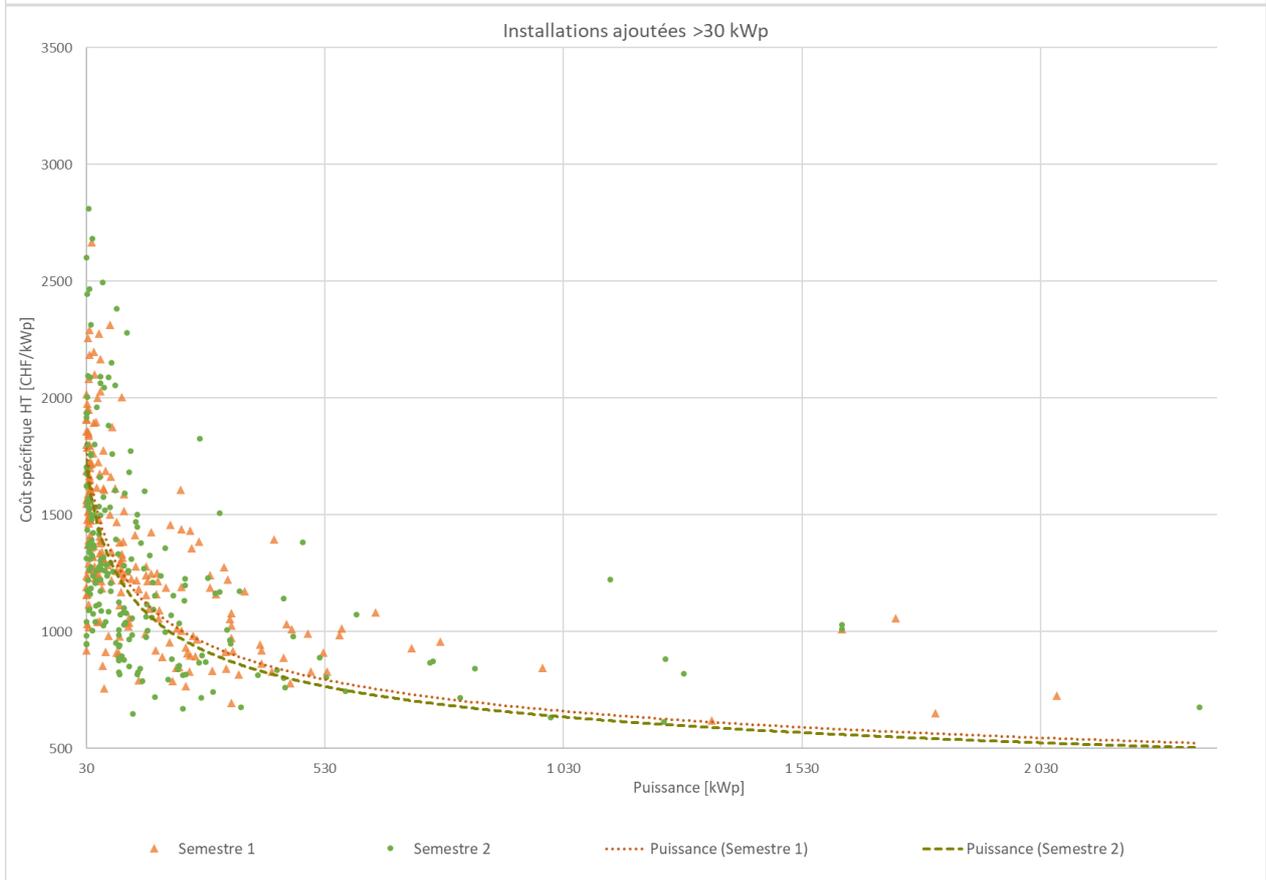
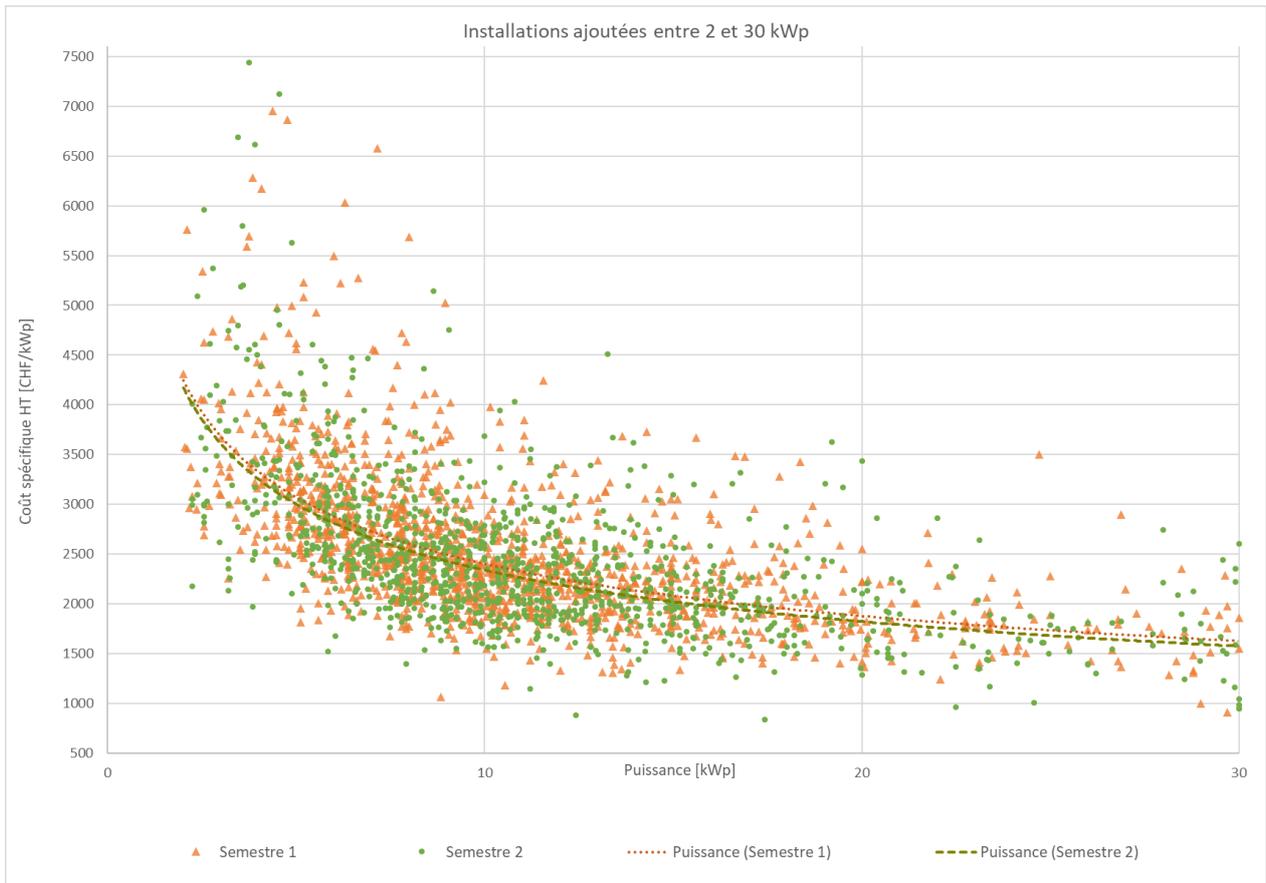


Figure 31 : Evolution entre le semestre 1 et le semestre 2 de 2020 du coût spécifique des installations photovoltaïques ajoutées. En haut la plage de données 2-30kWp, en bas >30 kWp. Les courbes de tendance de type "puissance" ont été obtenues par la fonction courbe de tendance d'Excel.

7. Coûts annexes et coûts réels

L'enquête principale porte sur les coûts de fourniture et pose d'une installation photovoltaïque selon la définition fournie au chapitre 2.1 Méthodologie. Ces coûts correspondent uniquement aux prestations facturées par l'installateur. L'objectif du présent chapitre est de quantifier les coûts annexes, non identifiés sur la facture de l'installateur, mais portés par la maîtrise d'ouvrage. Pour atteindre cet objectif, des entretiens ont été menés avec 5 maîtres d'ouvrage. Afin d'obtenir des données objectives, le nom des clients et projets ne paraissent pas dans le présent document.

Une description succincte des entreprises figure ci-dessous :

- Entité n°1 : exploitant de réseau avec activité de maîtrise d'ouvrage photovoltaïque ; proposition de contracting énergétique auprès de ses clients.
- Entité n°2 : exploitant de réseau avec activité de maîtrise d'ouvrage photovoltaïque ; proposition de contracting énergétique auprès de ses clients.
- Entité n°3 : propriétaire foncier d'envergure à l'échelle fédérale, développant un parc photovoltaïque sur ses bâtiments neufs ou en rénovation.
- Entité n°4 : commune romande de moins de 2'000 habitants.
- Entité n°5 : privé propriétaire d'une villa multifamiliale.

7.1 Coûts annexes

Coûts commerciaux

Les maîtres d'ouvrage qui ne réalisent pas les projets sur leurs bâtiments portent des coûts commerciaux dont l'objectif est la signature de contrats de fourniture d'énergie et contrat de servitude, permettant la construction et l'exploitation de la centrale.

- Entité n°1 : les coûts commerciaux sont répercutés sur le prix de vente de l'énergie à hauteur de 0.6 cts/kWh. Rapportés à l'investissement, ils représentent un montant de 120-150 CHF/kWp.
- Entité n°2 : les coûts commerciaux représentent les salaires de chargés d'affaires de l'unité maîtrise d'ouvrage. Les équivalents temps pleins, rapportés à la puissance photovoltaïque installée dans l'année, représentent un coût de 50 CHF/kWp environ.
- Entité n°3 : les réalisations sont effectuées sur ses propres bâtiments, aucun coût commercial n'est imputé.
- Entité n°4 : les réalisations sont effectuées sur ses propres bâtiments, aucun coût commercial n'est imputé.
- Entité n°5 : les réalisations sont effectuées sur ses propres bâtiments, aucun coût commercial n'est imputé.

Coûts internes de gestion de projet

Les entreprises n°1 et 2 ne font appel à des entreprises de planification externes que ponctuellement, et assurent la gestion de projets à l'interne (chargés d'affaires). Ces coûts représentent 50-230 CHF/kWp selon les projets et les entreprises, et ils comprennent la planification de l'ouvrage (maîtrise d'œuvre). Les coûts de maîtrise d'ouvrage représentent 50-100 CHF/kWp, les coûts de planification 0-130 CHF/kWp.

L'entreprise n°3 fait appel à un planificateur externe. Les coûts internes de gestion de projet sont ainsi fortement réduits et ne représentent que 1.5% du montant de l'investissement, soit de l'ordre de 15 CHF/kWp.

La commune (entreprise n°4) fait appel à un planificateur externe. Les coûts internes de gestion de projet représentent 7% du montant de l'investissement, soit environ 100 CHF/kWp.

L'entité n°5 est privée et assume la maîtrise d'ouvrage sur son temps libre.

Planification externe

Les coûts de planification externe varient fortement en fonction des prestations assurées et de la puissance installée. Pour des planifications complètes, les prix se situent :

- Pour des installations d'une puissance <50 kWp, 200-500 CHF/kWp.
- Pour des installations d'une puissance 50-100 kWp, 120-250 CHF/kWp.
- Pour des installations d'une puissance 100-300 kWp, 60-150 CHF/kWp.
- Pour des installations d'une puissance >300 kWp, 40-80 CHF/kWp.

Des prestations de planification partielle peuvent être assurées par des bureaux d'ingénieurs pour des maîtres d'ouvrage maîtrisant déjà les installations photovoltaïques. Elles ont souvent pour objectif d'apporter des ressources complémentaires et un gain de temps, et peuvent concerner les différentes phases SIA de la planification. Leur montant est très variable et se situe dans la fourchette 10-60 CHF/kWp.

L'entité n°5 assume une rénovation lourde de sa villa, et fait donc appel à un bureau d'architectes et d'ingénieurs pour la planification électrique, mais pilote la planification photovoltaïque sans prestataire externe. Le surcoût engendré en termes d'honoraires sur l'ingénierie est de 1'000 CHF.

Architecture

Lorsque l'installation est construite sur un bâtiment neuf ou en rénovation faisant appel à un architecte, des surcoûts d'architecture peuvent être appliqués en phase de conception et lors de la direction des travaux. Selon l'ampleur du projet, ces coûts peuvent aller de 0 à 15% du montant total de l'ouvrage.

Autres coûts

Les autres coûts associés à la gestion de projet sont listés ci-dessous :

- Frais de notaire : pour la création des servitudes notamment : 1'000-3'000 CHF par projet.
- Mise en place de la mesure (compteur) pour le contracting, ces coûts pouvant être importants dans le cadre de Regroupement pour la consommation propre (RCP) notamment.
- Etudes d'ingénierie ;
 - Etude statique : ces coûts varient fortement selon les bâtiments, l'existence de données disponibles et l'étendue de l'étude de l'ingénieur : 500-10'000 CHF.
 - Expertise d'étanchéité : s'il n'est pas prévu de rénover l'étanchéité avant la construction de la centrale, une expertise d'étanchéité de 500-3'000 CHF peut être nécessaire.

Sources de surcoût

Voici quelques situations qui peuvent encore amener un surcoût à l'installation photovoltaïque :

- Création d'un RCP : la création d'un RCP entraîne des surcoûts de planification et de mise en œuvre du dispositif de comptage, ainsi que des coûts administratifs et contractuels.
- Installation photovoltaïque sur un abri pour véhicules (carport).
- Bâtiment neuf : les coûts de construction sont réduits (comme analysé au chapitre 3.3 et visible à la Figure 14), mais les coûts de planification sont plus importants (coordination avec les autres corps d'état, perte d'autonomie dans la conception).

7.2 Impacts sur différents types de projet

L'impact sur 3 cas concrets a été étudié ci-dessous. La puissance de la centrale est de 200 kWp pour un coût de construction hors taxe de 240'000 CHF.

Cas 1 :

- Peu de frais d'ingénierie de la construction (étanchéité neuve, marge statique connue et confortable).
- Maîtrise d'ouvrage allégée et ingénierie confiée à un planificateur.
- Bâtiment construit, pas d'autres corps d'état sur le projet.
- Maître d'ouvrage propriétaire du bâtiment (pas de frais commerciaux ni de frais de notaire).

Cas 2 :

- Frais d'ingénierie sensiblement plus importants (marge statique connue et confortable, expertise étanchéité nécessaire).
- Solution de contracting énergétique : maîtrise d'ouvrage plus importante, frais commerciaux et frais de notaire.
- Participation légère aux frais d'architecture (rénovation lourde de bâtiment).

Cas 3 :

- Frais d'ingénierie importants : étude statique complexe, expertise étanchéité.
- Contracting énergétique : frais de maîtrise d'ouvrage importants, frais de notaire.
- Bâtiment en construction avec deux maîtres d'ouvrage (bâtiment et photovoltaïque) : coûts d'architecture et de maîtrise d'œuvre importants.

Ces différents cas sont décrits dans le tableau ci-dessous :

Coûts en CHF HT	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Facture installateur	240'000	240'000	240'000
Frais commerciaux	-	10'000	30'000
Etudes statique / étanchéité	1'000	3'000	13'000
Maîtrise d'ouvrage	3'000	6'000	20'000
Maîtrise d'œuvre	10'000	20'000	25'000
Architecture	-	12'000	30'000
Frais de notaire	-	1'000	3'000
Total	254'000	292'000	361'000

Le coût global du projet varie donc fortement suivant les différentes configurations. Dans l'exemple ci-dessus, l'ensemble des coûts annexes engendre un surcoût variant de 5% à 50% suivant les cas, illustré également à la Figure 32.

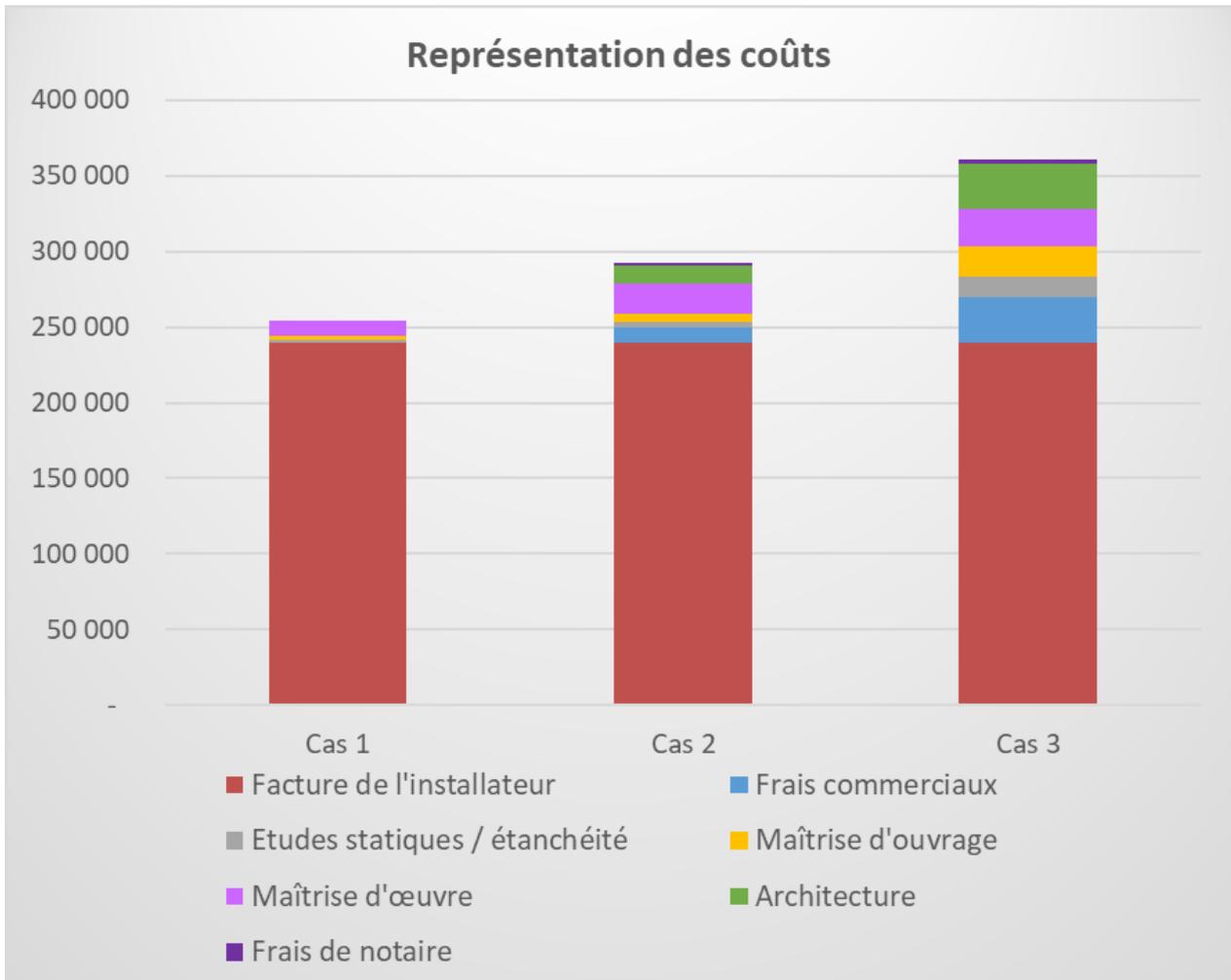


Figure 32 : Représentation graphique de l'impact des coûts annexes sur un projet de 200 kWp selon les 3 scénarios.

7.3 Conclusion

Ces données révèlent l'état global d'un projet dans un environnement professionnel, pour des installations de moyenne à forte puissance. Les petites installations ne sont généralement très peu, voire aucunement, influencées par les coûts listés dans ce chapitre. En effet pour un propriétaire privé de villa, lorsque le bâtiment est déjà construit, les études de statique ou d'étanchéité sont très rarement nécessaires, la maîtrise d'ouvrage est "gratuite" et le propriétaire ne fait généralement pas appel à un planificateur. La facture de l'installateur est donc souvent le seul coût porté par le maître d'ouvrage.

Pour les installations de taille moyenne et grande en revanche il est très rare que le maître d'ouvrage ne porte que le coût facturé par l'installateur. On remarque avec l'exemple du Cas 1 ci-dessus que même dans une situation très simple le maître d'ouvrage se retrouve à devoir payer 6% supplémentaires à la facture de l'installateur. Dans cet exemple cela correspond à 70 CHF/kWp.

Pour toutes ces installations, le coût réel d'un projet photovoltaïque n'est donc pas celui donné par la facture de l'installateur et analysé dans les chapitres précédents. Il faut ajouter des coûts annexes variant de 5% à 50% des coûts de l'installateur. Une analyse complète doit prendre en compte ces coûts.

Le modèle qui décrirait le mieux le coût complet d'une installation photovoltaïque ajoutée est le suivant :

$$y = \left(\frac{5523}{x^{0.4862}} + 156.2 \cdot e^{-0.2321 \cdot x} + 578.4 \right) * (1+a)$$

Où a est un pourcentage compris en 0% et 50% qui prend en compte les coûts annexes.

Le surcoût a dépend de nombreux paramètres et pour l'estimer nous référons à l'analyse du chapitre 7.2 et au détail de chapitre 7.1.

8. Facteurs influençant les coûts

Ce chapitre reprend les conclusions du rapport sur l'observation du marché 2019 avec une actualisation au regard d'évolutions apparues sur l'année 2020. Il a pour objectif d'identifier les facteurs techniques influençant les coûts. Bien que non exhaustif, il permet d'observer l'impact des caractéristiques du bâtiment pouvant mener à un projet plus ou moins onéreux.

La norme sur les installations électriques a été mise en application en 2020. Devenue obligatoire pour toute installation annoncée après le mois de juin, elle constitue le nouveau référentiel, sans apporter d'évolution majeure sur la conception des installations.

Cheminement des câbles

Avec la baisse régulière des coûts du matériel photovoltaïque ces dernières années, le cheminement des câbles prend une part plus importante dans le prix des installations, en termes de matériel, mais surtout de main-d'œuvre.

En toiture, il n'existe pas d'exigences de canalisation pour les câbles cheminant sous les modules. Au contraire, les câbles en dehors du champ de modules doivent être protégés contre les agressions extérieures. Les longueurs de câblage en toiture hors champ de modules (par exemple pour rejoindre la façade, un col de cygne ou relier deux champs entre eux) sont donc un facteur d'influence important.

Dans le bâtiment, le nombre de percements, de canalisations disponibles, de traversées de pièces non techniques sont des facteurs d'influence. Également, des longueurs importantes peuvent entraîner des exigences supplémentaires en termes de protection foudre, et la traversée d'espaces présentant un danger d'incendie entraîne des exigences sur le type de canalisations employées.

En cas de raccordement en dehors du bâtiment, une éventuelle fouille entraîne un surcoût qui peut rapidement devenir considérable.

Type de toiture et surfaces disponibles

Il existe une différence de prix importante selon le type de toiture :

- Les toitures inclinées en tôle métallique trapézoïdale permettent généralement d'obtenir les meilleurs prix sur les installations (voir Figure 18), lorsque l'installation peut être fixée directement sur la tôle. Le système de fixation est léger et composé de peu d'éléments, donc bon marché. Le temps de pose est également réduit.
- Les installations sur d'autres types de toitures inclinées (tuiles, tôle ondulée) ou sur tôle métallique trapézoïdale fixées dans la charpente sont un peu plus onéreuses : le temps de pose est plus important, et la structure contient plus de pièces et matériaux.
- Pour les installations sur toitures plates, d'autres facteurs entrent en ligne de compte. La présence de gravier en toiture permet le lestage des modules, mais entraîne également des contraintes de préparation de la toiture (nécessité de poser les structures sous les graviers). Ainsi, une installation coordonnée (à la construction ou à la rénovation) permet de placer les structures avant le gravier, de lester avec le gravier et donc de minimiser les coûts. Dans le cas contraire, un soufflage du gravier, ou la fourniture et pose de palettes de lestage peuvent engendrer des coûts de matériel, mais surtout de main-d'œuvre plus élevés.
- La généralisation des procédés à double orientation permet des économies sur le projet : la structure de montage est moins onéreuse, et une plus forte puissance permet de générer des économies d'échelle. La production rapportée à la puissance installée est cependant légèrement inférieure.
- De plus en plus de toitures sont végétalisées : les installations sur ce type de toiture sont relativement plus onéreuses et présentent également un risque sur la maintenance (nécessité d'entretenir la toiture afin de contenir la végétation).

La configuration de la toiture, ainsi que les éléments techniques qui y sont présents (groupes de ventilation, cheminée, etc.), impactent fortement le coût :

- Un calepinage en plusieurs zones a un impact sur la quantité de câblage et de canalisation, sur le coût de la structure de montage, ainsi que sur la quantité de lestage nécessaire.
- Une toiture ou des champs de forme rectangulaire et de taille importante sont donc plus propices à une installation moins onéreuse.
- Avec l'évolution des exigences et des labellisations en termes de performance énergétique, de plus en plus d'équipements techniques sont présents en toiture. Ces équipements complexifient les calepinages et réduisent la surface disponible. Les installations sur les bâtiments Minergie par exemple sont donc relativement plus coûteuses.

Contraintes architecturales (couleur, intégration)

Selon les exigences architecturales associées au bâtiment (souhaits particuliers du propriétaire, projet par un architecte, contraintes des autorités, zones classées, volonté d'exemplarité), du matériel spécifique peut être employé, comme des modules à cadre et tedlar noir, des systèmes de fixation plus discrets, ou encore une mise en œuvre plus complexe (cheminement des câbles invisible, calepinage spécifique). Le niveau d'exigence peut entraîner des surcoûts importants. Les modules à cadre et tedlar noirs deviennent progressivement la norme sur les installations résidentielles, du fait du moindre impact du coût d'approvisionnement des modules.

Etat de la construction

Les installations photovoltaïques peuvent être mises en œuvre seules, en cas de rénovation de toiture ou sur un bâtiment neuf. Les impacts sur les coûts peuvent être nombreux :

- Des coûts de coordination avec les autres corps d'état doivent être pris en compte.
- Des coûts d'architecture et de direction de chantier peuvent également être appliqués.
- Une bonne coordination peut réduire de manière importante les coûts de préparation du chantier.
- Certains coûts peuvent être mutualisés avec les autres entreprises (sécurité de chantier notamment).

Sécurité

La configuration du bâtiment et du calepinage peut impacter les coûts de sécurité de chantier (bâtiment particulièrement élevé, nécessité d'échafaudage). Également, en cas de construction ou rénovation, ces coûts peuvent être mutualisés, voire pris en charge par une autre entreprise ou la direction des travaux. La sécurité permanente (accès et sécurisation des bords de toit) peut également refléter des coûts considérables. Même si celle-ci ne sert pas que pour l'exploitation photovoltaïque, elle est souvent identifiée au budget de cette dernière. Elle constitue pourtant une réelle plus-value pour le bâtiment.

Le choix de la sécurisation permanente a un impact important : une sécurisation avec points d'ancrage lestés par le gravier est significativement moins chère qu'une sécurisation avec ligne de vie fixée sur la structure du bâtiment. La seconde solution constitue cependant une option apportant une meilleure sécurité. Les lignes de vie fixées sur la structure de support photovoltaïque sont moins onéreuses que celles fixées dans le bâtiment, mais ont une durée de vie associée à l'installation photovoltaïque, alors que la ligne de vie fixée dans le bâtiment peut perdurer après la période d'exploitation.

Démarches administratives

Certaines démarches ne sont pas applicables à tous les chantiers. La demande d'approbation des plans par l'ESTI ne concerne que les installations supérieures à 30 kVA, et la plupart des installations sont exemptées de permis de construire. Ces démarches reflètent donc des surcoûts pour certains types d'installation.

Depuis 2018, un contrôle de réception est nécessaire pour les installations de moins de 30 kVA. Ce contrôle génère un surcoût pour l'installateur qui est reporté sur la facture du maître d'ouvrage. En comparaison avec d'autres pays (Belgique, Australie), l'administratif constitue une part très importante dans le budget d'un projet.

La suppression, en 2021, de la demande d'approbation des plans et des démarches relatives à l'ESTI devrait constituer une diminution des coûts administratifs.

Monitoring, performances et gestion de l'énergie

La nécessité d'autoconsommer au maximum l'énergie produite induit l'opportunité de monitorer la production et la consommation. Concrètement, un datalogger ou un onduleur communicant sont mis en œuvre, ainsi qu'un dispositif de mesure au point d'injection. Ces dispositifs permettent au consommateur d'adapter ses habitudes pour optimiser la consommation propre. Ils génèrent un surcoût sur le projet.

De plus en plus de projets intègrent également le pilotage d'une pompe à chaleur, ou de mobilité électrique. Un datalogger, des dispositifs de mesure ainsi que du matériel smart pour les équipements sont nécessaires.

Enfin, la possibilité d'optimiser sa production, notamment en cas d'ombrage, grâce à des micro-onduleurs ou des optimiseurs de puissance génèrent un coût sensiblement plus élevé de projet.

Raccordement / installations et sécurité électriques

En cas de tableaux électriques existants suffisamment dimensionnés, le raccordement de l'installation en consommation propre ne présente pas une part importante de l'investissement global. Cependant, le coût peut vite augmenter si une nouvelle armoire doit être posée, si le local électrique n'est pas suffisamment dimensionné ou si le câble d'introduction doit être remplacé. Ces coûts peuvent représenter jusqu'à 30% du budget global de l'opération.

En fonction du type de bâtiment, des contraintes en termes de sécurité incendie peuvent également être appliquées. Un local coupe-feu peut être demandé pour les onduleurs, des dispositifs de coupure d'urgence pour faciliter l'intervention des sapeurs-pompiers, des organes supplémentaires de coupure et sectionnement.

Marché et concurrence

L'état du marché constitue un réel facteur influençant les coûts. Un marché dynamique permet de réduire les coûts commerciaux, avec une quantité plus importante de prospects ciblés. Cependant, la concurrence accrue entre installateurs entraîne une contrainte sur les marges bénéficiaires des entreprises.

Marché public ou privé

Dans le cas d'un marché public, les coûts peuvent être plus élevés que pour un marché privé. Les lois sur les marchés publics impliquent la complétude d'un certain nombre de pièces administratives pour l'installateur, et la constitution d'un dossier de soumission pour le maître d'ouvrage, qui mandate dans la plupart des cas un planificateur externe. Une installation réalisée au travers d'un marché public peut sensiblement être plus onéreuse.

Regroupements pour la consommation propre

Avec la parution de l'ordonnance révisée sur l'énergie début 2018, de plus en plus d'installations sont raccordées en Regroupements pour la Consommation Propre (RCP). Il en résulte des projets dont les coûts sont plus élevés, au niveau de l'installation et de la gestion. La modification de tableaux existants, la fourniture et la pose de compteurs privés ainsi que le déplacement de la limite de propriété réseau / installation intérieure entraînent des surcoûts d'installation. La gestion administrative pour la création du regroupement, l'obtention de différents accords (propriétaires, locataires, gestionnaire de réseau), la communication et le choix du prestataire de service génèrent également des coûts de gestion de projet pour le maître d'ouvrage

NIBT 2020

La NIBT 2020 n'apporte pas d'évolutions majeures en termes de contraintes sur l'installation électrique pour les installations photovoltaïques.

Elle permet d'alléger la protection contre la foudre dans le cas où le bâtiment n'est pas équipé de paratonnerre. L'installation de parasurtenseurs n'est désormais plus obligatoire sous certaines conditions (type et longueur des canalisations). Il en résulte un allègement des coûts, notamment pour les villas rarement équipées de paratonnerre, avec une possibilité accrue de ne pas installer de coffret de protection côté courant continu.

COVID

La situation Covid survenue dès mars 2020 vient rapidement à l'esprit quand on pense aux facteurs influençant les coûts en 2020. La Figure 29 (chapitre 6) montre néanmoins une baisse des coûts des installations sur le premier semestre 2020 par rapport à l'année 2019. S'il est possible, voire probable, qu'une hausse de prix ait eu lieu à cause de la pandémie, cette dernière a été moins impactante que la baisse générale des coûts du matériel.

Conclusion sur les facteurs influençant le coût

Entre les années 2019 et 2020, les facteurs présentés ci-dessus n'ont pas ou peu influencé les coûts des installations photovoltaïques. Les entretiens menés avec les installateurs font état d'un marché plus dynamique, mais sur lequel persiste une forte tension sur les prix et les marges.

La plupart des facteurs exposés ci-dessus ne sont pas nouveaux. Ils dépendent des caractéristiques du bâtiment et de l'état de la technique. Cependant, la baisse des coûts du matériel, et notamment des panneaux photovoltaïques, donne un impact beaucoup plus important aux sources de surcoût. Ainsi, la réduction de la marge d'incertitude sur le coût des installations, associée à la standardisation des techniques et l'expertise accrue des installateurs, est plus que compensée par ces facteurs d'influence.

9. Conclusion

L'étude a analysé 3'533 données de coûts d'installations photovoltaïques selon les prestations de l'installateur recueillies principalement auprès d'installateurs. Avec une focalisation, particulièrement sur les 3'088 données d'installations ajoutées, l'étude a permis de déterminer des coûts spécifiques médians par plage de puissance et une courbe de référence générale et continue. Une analyse a été menée montrant l'influence de plusieurs facteurs sur les coûts. Il est également ressorti qu'aucun facteur est trop impactant et perturbe les données globales, toutes les données ont ainsi pu être conservées grâce au volume permettant de compenser statistiquement les différents facteurs.

L'analyse de la répartition des coûts a montré une évolution de cette répartition par rapport à la puissance. Entre autres, plus la puissance augmente plus la part du coût des modules devient importante, alors que la part du coût de la main-d'œuvre reste relativement constante. Ensemble ces deux parts correspondent à au moins 50% des coûts globaux, quelle que soit la puissance.

La comparaison avec les données récoltées lors de l'observation du marché 2019 a indiqué une baisse des prix sur toutes les plages de puissance considérées.

En plus des coûts directement liés aux prestations de l'installateur, les maîtres d'ouvrage peuvent se retrouver face à un certain nombre de coûts annexes qui augmentent le coût global de l'installation. L'étude a montré que ces coûts sont particulièrement importants pour les installations de tailles moyenne et grande et peuvent augmenter de 5% à 50% le coût global de l'installation. Le coût réel d'un projet photovoltaïque n'est pas celui donné par la facture de l'installateur et une analyse complète doit prendre en compte ces coûts annexes. Des projets avec RCP ou sur carport amèneront encore d'autres surcoûts.

La présente observation des prix du marché photovoltaïque a permis une analyse complète autant qualitative que quantitative sur les coûts des installations photovoltaïques en Suisse en 2020. Pour permettre d'accroître la richesse de l'analyse dans les années futures, il sera important d'avoir autant de données et surtout plus de détails sur les installations. Certains facteurs n'ont en effet pas pu être analysés complètement par manque de données avec les informations correspondantes. Il sera important d'avoir également un maximum de données avec la répartition des coûts connues. Une richesse ultime à l'analyse serait de pouvoir recueillir suffisamment de données avec la connaissance des coûts annexes afin d'intégrer ceux-ci dans l'analyse globale et d'en tirer une courbe de référence et des données statistiques des coûts réels des projets photovoltaïques pour les maîtres d'ouvrage.

10. Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les entreprises et les personnes qui nous ont aidées à recueillir les données. Il s'agit notamment de tous les installateurs qui ont participé indirectement à ce rapport grâce aux données fournies. En particulier, ce rapport n'aurait pas pu avoir lieu sans ceux qui ont pris le temps de détailler les caractéristiques de chaque installation photovoltaïque et ceux qui nous ont envoyé le détail des coûts des installations.

Nous remercions également les maîtres d'ouvrage qui ont pris le temps d'identifier avec nous les coûts globaux des installations photovoltaïques en analysant les coûts annexes supplémentaires aux coûts de l'installateur.