

Feuille de route stratégique **SOLAIRE THERMIQUE**



Feuille de route stratégique

Préambule

Depuis 2010, l'ADEME gère quatre programmes dans le cadre des investissements d'avenir¹. Des groupes d'experts issus de la recherche dans les secteurs de l'industrie, des organismes de recherche et des agences de financement et de programmation de la recherche, sont chargés, dans le cadre d'un travail collectif, de la réalisation de feuilles de route stratégiques. Celles-ci sont utilisées pour lancer les Appels à manifestations d'intérêt (AMI). En ce qui concerne le solaire thermique, la feuille de route a pour objectif :

- D'éclairer les **enjeux industriels, technologiques, environnementaux et sociétaux** du développement de la filière;
- D'élaborer des **visions cohérentes et partagées** des technologies ou des systèmes sociotechniques en question à moyen et long termes ;
- D'identifier les **verrous technologiques, organisationnels, environnementaux et socio-économiques**, et donc d'initier (ou de poursuivre) le développement de technologies performantes et économiquement viables ;
- De mettre en avant les **besoins et priorités de recherche, de développement, d'innovation et d'accompagnement** à déployer pour améliorer la compétitivité des offres et des entreprises dans ce secteur, permettre d'atteindre les objectifs ambitieux établis dans le cadre du Grenelle de l'environnement, favoriser et accompagner le développement d'une filière française. Ces **besoins** peuvent servir ensuite de base pour :
 - La rédaction des AMI ;
 - La programmation de la recherche au sein de l'ADEME et d'autres institutions comme l'Agence nationale de la recherche (ANR), le Comité stratégique national sur la recherche énergie ou l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE).

Ces priorités de recherche et d'expérimentation proviennent du croisement entre les visions et les verrous, mais prennent également en compte les **capacités françaises dans les domaines de la recherche et de l'industrie**.

¹ Les investissements d'avenir s'inscrivent dans la continuité des orientations du Fonds démonstrateurs de recherche géré par l'ADEME. Les quatre programmes concernés sont : Énergie renouvelable, décarbonée et chimie verte (1,35 milliard d'euros), Véhicules du futur (1 milliard d'euros), Réseaux électriques intelligents (250 millions d'euros) et Économie circulaire (250 millions d'euros).

Liste des membres du groupe d'experts

<i>Nature de l'organisme</i>	<i>Nom</i>	<i>Organisme d'appartenance</i>
Fabricant	Bernd HAFNER	VISSMANN
	Olivier GODIN	SOLISART
	Dominique VILLIER / J.F. PETIT	JACQUES GIORDANO Industrie
	Elsa DEMANGEON	SER (Syndicat des Energies Renouvelables)
	Valérie LAPLAGNE	UNICLIMA
	Richard LOYEN	ENERPLAN (syndicat des professionnels de l'énergie solaire)
Bureau d'étude + plateforme européenne RHC	Daniel MUGNIER	TECSOL
B.E.	Alain FILLOUX	ALPHEEIS
Utilisateur / gestionnaire	Jean-Claude FRICHET	EDF
	Elisabeth AUBERT / Margarita CHEREPANOVA	GrDF / GDF Suez
	Audrey GUILMIN / Catherine DICOSTANZO	Union Sociale pour l'Habitat (USH)
Organisme public	Philippe PAPIILLON	CEA INES + plate-forme européenne RHC
	Dominique CACCAVELLI	CSTB
	Xavier CHOLIN	INES Education
Centre d'essais et de recherche (certification)	Emmanuel LEGER / Alain GEVAUDAN	BELENOS

Le groupe d'experts a reçu l'appui d'un secrétariat technique composé de Céline COULAUD, Rodolphe MORLOT, Bouzid KHEBCHACHE, Jean-Michel PARROUFFE, Daniel CLEMENT et Nicolas TONNET de l'ADEME.

Plan

1. Contexte	5
1.1. Filière solaire thermique	5
1.2. Demande énergétique	13
2. Périmètre de la feuille de route	15
2.1. Champ thématique	15
2.2. Périmètre géographique	16
2.3. Horizons temporels.....	17
3. Défis et enjeux de la filière « solaire thermique»	18
3.1. Evolution, structuration et professionnalisation de la filière / Formation	18
3.2. Compétitivité / Application des technologies	19
3.3. Acceptation socioculturelle	20
3.4. Accroître l'indépendance énergétique par/pour la production de chaleur renouvelable	20
4. Visions prospectives.....	21
4.1. Paramètres clés.....	21
4.2. Les visions 2050	22
4.3. La vision moyen terme 2020	26
5. Les verrous	28
5.1. Verrous technologiques.....	28
5.2. Verrous (non-technologiques) à caractère juridique, organisationnel, réglementaire et socio-économique.....	31
6. Les priorités de recherche.....	34
6.1. Priorités technologiques : volet système	35
6.2. Priorités technologiques : volet composant.....	38
6.3. Priorités non-technologiques.....	41

1. Contexte

1.1. Filière solaire thermique

1.1.1. France

Le plan de développement des énergies renouvelables de la France issu du Grenelle de l'Environnement, présenté le 17 novembre 2008, vise à augmenter de 20 millions de tonnes équivalent pétrole² (tep) la production annuelle d'énergies renouvelables pour porter la part des énergies renouvelables à au moins 23 % de la consommation d'énergie finale d'ici 2020. Cet objectif a été inscrit dans la loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

Le Grenelle de l'environnement prévoit une contribution notable de la filière solaire thermique avec une distinction équipement individuel / collectif ; les objectifs initiaux³, en matière de contribution annuelle à l'horizon 2020, sont respectivement pour l'individuel et le collectif de 817 ktep⁴ (17 ktep en 2006) et 110 ktep⁵ (10 ktep en 2006). Face à ces objectifs ambitieux, les obstacles principaux à surmonter sont la diminution des coûts, l'amélioration des performances des systèmes installés et des besoins importants de formation professionnelle.

La demande en chaleur compte pour une part importante dans la demande énergétique mondiale. Le secteur des bâtiments représente à lui seul 35.3%, dont 75 % pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (IEA, 2006). Au niveau européen, la consommation d'énergie finale pour la chaleur et le froid (49 %) est supérieure à celle pour l'électricité (20 %) et pour les transports (31 %).

Courant 2009, le **Fonds Chaleur** a été lancé avec l'objectif d'apporter aux entreprises et collectivités une visibilité sur les aides financières à partir de règles de calcul précises et une aide à l'investissement afin d'assurer la rentabilité de projets de valorisation thermique d'énergies renouvelables ; le rôle de ce fonds, doté d'un milliard d'euros sur trois ans, étant de financer des projets dans les secteurs de l'habitat collectif, du tertiaire et de l'industrie.

Le bilan en cours de route du Fonds Chaleur, volet solaire thermique, met en évidence un réel impact sur la filière avec en parallèle de nombreuses pistes d'amélioration. Fin août 2011, 875 projets avaient

² 1 tep = 11.63 MWh \Rightarrow 20 Mtep = 232.6 TWh ; la relation considérée entre aire des capteurs solaires thermiques, capacité et énergie produite est la suivante : 1 m² = 0.7 kWth (kilowatt thermique) équivalent à 0.468 MWh/m² par an (en France métropolitaine) : productivité moyenne estimée par simulation

³ Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale, comité opérationnel n°10 (2008)

⁴ 817 ktep soit l'équivalent d'une capacité de 14 GWth = 20 millions m²

⁵ 110 ktep soit l'équivalent d'une capacité de 1.92 GWth = 2.75 millions m²

m ²	Puissance installée		Production énergétique			
	kWth	GWth	MWh	TWh	TEP	kTEP
1	0.70		0.47		0.0402	
2 750 000	1 925 000	1.93	1 287 000	1.29	110 662	111
20 000 000	14 000 000	14.00	9 360 000	9.36	804 815	805

bénéficié de ce fonds pour une production de 839 tep annuelle et représentant 7% du budget global, soit 16.5 M€ en 2011⁶. On constate cependant que le coût du m² installé (> 1 200 €/m² dans le collectif), et corrélativement de la tep produite (~ 25 000 €/tep si l'on considère le ratio entre l'investissement solaire total et la quantité d'énergie produite par le système sur une année moyenne, et non pendant sa durée de vie et/ou d'amortissement^{7,8}), reste à un niveau élevé, susceptible de mettre cette filière en concurrence avec le solaire photovoltaïque. . Dans le cadre du fonds chaleur, un suivi des installations et des performances est prévu au cours de la première année qui fait suite à l'installation du système. Toutefois, le Fonds Chaleur semble plutôt adapté aux grosses installations de biomasse et de géothermie, et reste lourd à mettre en œuvre pour des installations solaires de taille moyenne, tant au niveau du financement que du dispositif de suivi des performances. Les installations individuelles, non éligibles au Fonds Chaleur, sont visées par le **crédit d'impôt développement durable (CIDD)**, crédits qui bénéficient aux dépenses destinées à améliorer la performance énergétique des maisons et appartements.

Entre les solutions individuelles visées par le CIDD et les installations sous le coup du Fonds Chaleur, restent des **installations intermédiaires** destinées au petit collectif et de type SSC⁹ qui ne peuvent pleinement bénéficier d'aides financières notables (hormis dans certains cas de prêts à taux zéro ou d'aides régionales ou locales).

Avec la méthode internationale harmonisée d'évaluation du coût de production d'énergie dit « LCOE » (Levelised Cost of Energy), une durée de vie de 20 ans, et un taux d'actualisation de 6%, le coût de production d'un kWh solaire est de l'ordre de¹⁰ :

- 17 c€/kWh (Sud) à 27 c€/kWh (Nord de la France), dans le collectif (éligible FC)
- 40 c€/kWh (Sud) à 60 c€/kWh (Nord de la France), dans l'individuel (éligible CIDD)
- 31 c€/kWh (Sud) à 44 c€/kWh (Nord de la France), pour les SSC (non éligibles au FC et CIDD)

Les premières priorités pour favoriser le développement des solutions solaires thermiques sont donc **la réduction des coûts à toutes les étapes de la chaîne de valeur des projets**, l'amélioration et la fiabilisation de la qualité des systèmes et de leur productivité, la certification et la standardisation des systèmes, la simplification des schémas hydrauliques et une meilleure visibilité sur les mécanismes incitatifs.

Le marché français, en matière de surface de capteurs installés, a rapidement évolué depuis une dizaine d'années. La période 2005-2008 a été l'occasion d'une croissance marquée pour les différents systèmes proposés (chauffe-eau solaire individuel CESI, système solaire combiné SSC et collectif).

⁶ Source : 3^{ème} réunion concertation Chaleur Renouvelable, 08/09/2011

⁷ Par ailleurs, il est à noter que le "carburant" utilisé est gratuit (rayonnement solaire), contrairement notamment à la filière biomasse, également ciblée par le fonds chaleur

⁸ En complément ou remplacement de cette valeur (€/tep sur une année), il est proposé d'utiliser la méthode de calcul LCOE_{th} qui calcule le prix du kWh de chaleur solaire

⁹ SSC = système solaire combine : système qui participe à la fois à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage

¹⁰ Les hypothèses de productivité sont de : 300 kWh/m² (sud) et 200 (Nord) pour les CESI, 350 kWh/m² et 250 (Nord) pour les SSC et de 600 kWh/m² et 400 (Nord) pour le STC. Productivités moyennes mesurées en France.

Cependant, depuis 2008, la tendance s'est inversée (figure 1) : comparativement au scénario de développement prévu dans la PPI Chaleur¹¹, on observe depuis 2008 un décrochage important entre la courbe correspondant aux objectifs et la trajectoire réelle, en matière de surface de capteurs installés (figure 2). La part des SSC est à un niveau très faible (8% en 2011) et ne cesse de diminuer depuis 2009. Un point positif concerne le segment de marché du collectif avec une croissance constante : 56 000 m² en 2008, 66 000 m² en 2009 et 104 000 m² en 2011¹².

Avec un marché 2010 en métropole inférieur à 258 000 m², le parc brut installé est supérieur à 2 millions de m² (1,4 GWth) pour une production associée qui devrait dépasser les 80 ktep.

L'étude « Potential of Solar Thermal in Europe » d'ESTIF présente un potentiel de parc européen installé en 2050 entre 5,3 et 8 m²/habitant d'après le scénario (« Advanced Market Deployment » ou « Full R&D and Policy Scenario »), conduisant à un potentiel de surface installée en France entre 371 et 560 millions de m² (*hypothèse 2050 : 70 millions d'habitants en France*).

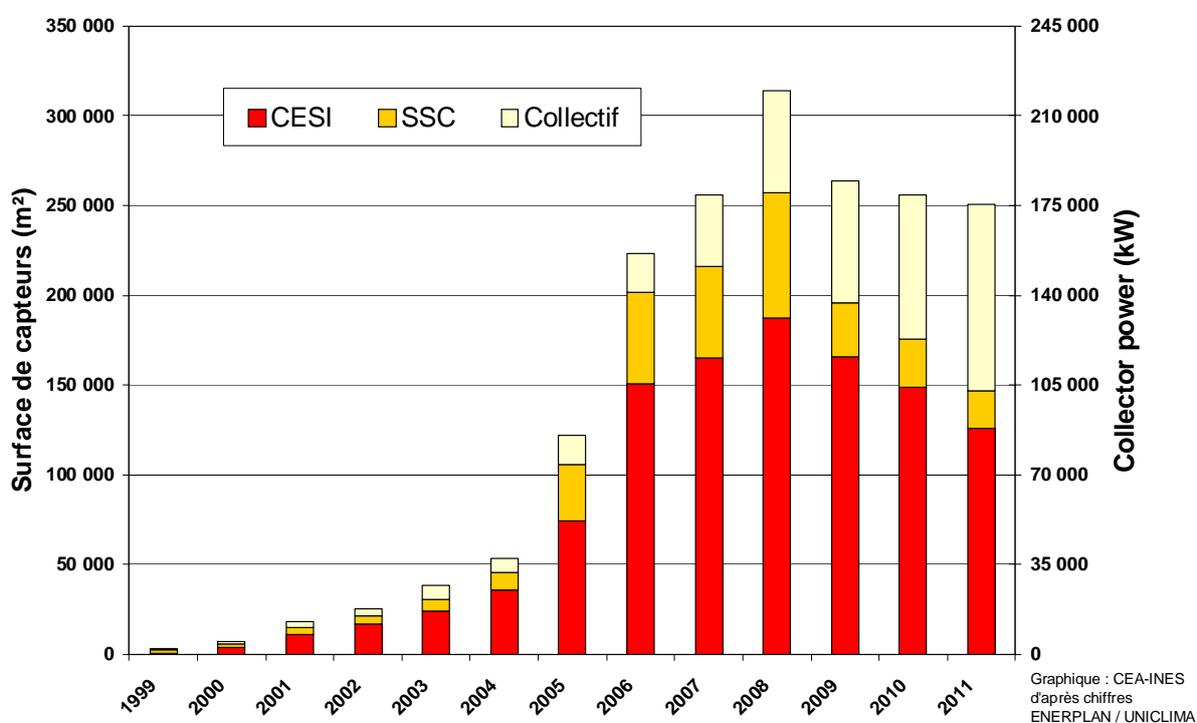


Figure 1 : Evolutions du marché français (m²/an)

¹¹ Programmation pluriannuelle des investissements de production de chaleur (période 2009-2020)

¹² Source : Uniclimate, Enerplan

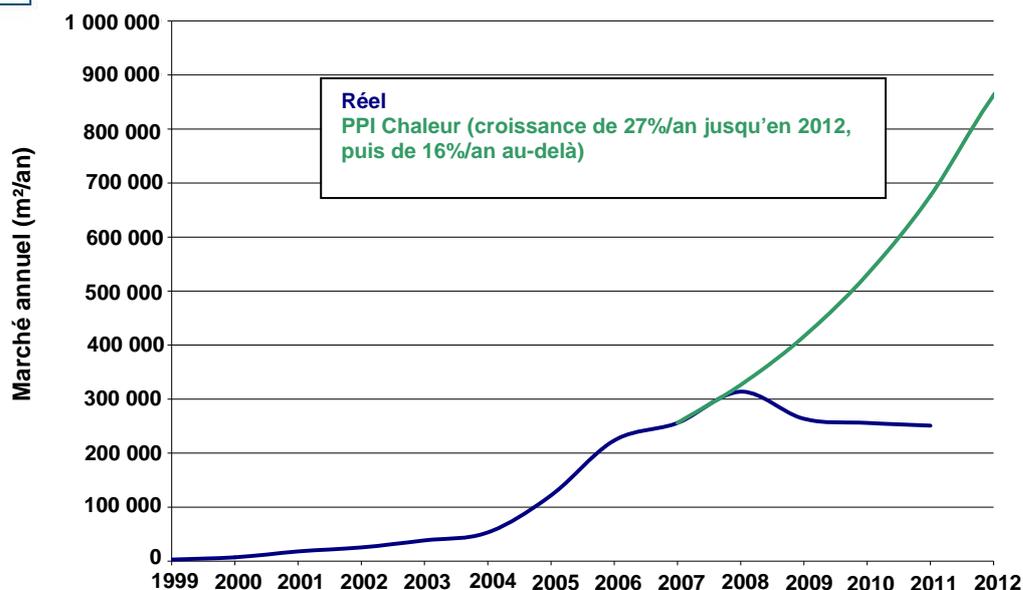


Figure 2 : Comparaison trajectoires nationales PPI Chaleur et réelle

1.1.2. Europe

La surface annuelle des capteurs installés dans les pays de l'Union Européenne en 2009 atteint près de 4.17 millions de m² (équivalent à une puissance thermique de 2.9 GWth), résultat marquant une baisse de 9.6 % comparativement à la surface posée durant l'année 2008 où près de 4.61 millions de m² avaient été installés. A noter qu'en 2010, la baisse s'est poursuivie pour un total de 3.7 millions de m² (soit 2.6 GWth)¹³ mais pour 2011, le montant de surface installée s'est stabilisé à environ 3.7 millions de m².

Types de capteurs	Opérationnels		Marché annuel						Evolution du marché 2010/2009 Plats + sous-vide %
	2010		2008	2009	2010			Plats + sous- kWth	
	Plats + m ²	sous-vide kWth	Plats + m ²	sous-vide m ²	Plats + sous-vide m ²	Plats m ²	Sous vide m ²		
Allemagne	13 824 000	9 676 800	2 100 000	1 615 000	1 150 000	1 035 000	115 000	805 000	(-) 28.8
Autriche	3 836 509	2 685 556	347 703	356 166	279 898	268 093	11 805	195 929	(-) 21.4
Espagne	2 106 866	1 474 806	433 000	391 000	336 800	315 300	21 500	235 760	(-) 13.9
France (métropolitaine)	1 573 900	1 101 730	313 000	265 000	256 000	247 000	9 000	179 200	(-) 3.4
Grèce	4 084 200	2 858 940	298 000	206 000	214 000	212 500	1 500	149 800	3.9
Italie	2 671 730	1 870 211	500 000	475 000	490 000	427 500	62 500	343 000	3.2
Royaume-Uni	573 220	401 254	81 000	89 100	105 200	75 600	29 600	73 640	18.1
Suisse	895 492	626 844	112 833	145 640	140 000	130 000	10 000	98 000	(-) 3.9

Figure 3 : Evolution du marché de pays membres de l'Union Européenne
(source ESTIF, Solar Thermal Markets in Europe)

Au niveau européen, la plate-forme européenne des technologies solaires thermiques ESTTP (European Solar Thermal Technology Platform) rassemble l'ensemble des acteurs de la filière pour proposer des visions de développement aux horizons 2030/2050 et surtout participer à l'identification des priorités de recherche et besoins structurels pour atteindre les objectifs de la vision prospective en

¹³ Source : Solar Thermal Markets in Europe 2011, Trends & market statistics 2010, June 2011, ESTIF

mettant en avant des propositions de sujet de R&D transversaux et bénéfiques à la majorité des partenaires européens. Cette plate-forme a été créée en 2006 par la fédération européenne de l'industrie solaire thermique ESTIF (European Solar Thermal Industry Federation) et par l'agence européenne des centres de recherche dans les énergies renouvelables (EUREC Agency). Plus récemment, la plate-forme technologique européenne sur la chaleur et le froid renouvelables s'est développée (RHC, Renewable Heating & Cooling) pour rassembler l'ensemble des acteurs des différentes filières énergétiques renouvelables concernées (géothermie, solaire, biomasse) ; l'objectif étant d'aller au-delà d'une approche « filière » et de proposer une vision commune pour les secteurs de la chaleur et du froid renouvelables en Europe, en tenant compte des priorités et développements communs. Courant 2011, un groupe de travail transversal de cette plate-forme a élaboré un document de référence pour mettre en avant les complémentarités des filières, les bénéfices de cette approche globale pour l'atteinte d'objectifs ambitieux¹⁴ et a publié un scénario prospectif dans lequel l'énergie solaire thermique permettrait de couvrir potentiellement 50% de la demande de chaleur totale à l'horizon 2050 ; ce scénario proposant également une production de chaleur, au niveau européen, 100% renouvelable en 2050 (solaire thermique, géothermie, biomasse).

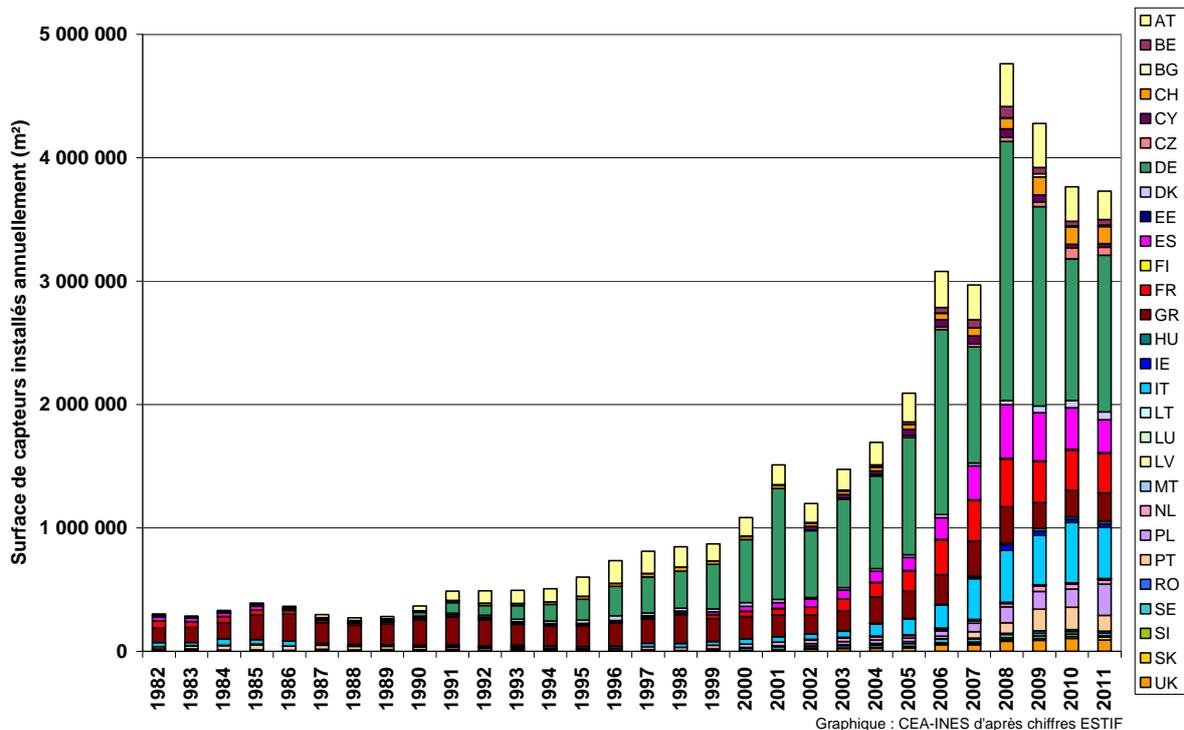


Figure 4 : Surface annuelle de capteurs installés au sein de l'Union Européenne et de la Suisse

Le ralentissement observé depuis 2009 pour l'ensemble des technologies solaires thermiques (capteurs vitrés, non vitrés et sous vide) aboutit à un écart important entre les objectifs fixés et les réalisations actuelles. Cependant, le potentiel solaire thermique de l'Union Européenne reste élevé et,

¹⁴ Common Vision for the Renewable Heating & Cooling sector in Europe (2020-2030-2050) – European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling, 2011

dans le cadre de scénarios ambitieux, la filière peut encore contribuer à l'atteinte des objectifs 2020, aussi bien européens que nationaux (figures 5 et 6).

		2020				
		2006	BAU	AMD	NREAPs	RDP
Spec. Collector Area	kW _{th} /inhab	0.03	0.14	0.21	0.2	0.56
	m ² /inhab	0.04	0.2	0.3	0.29	0.8
Total Installed Capacity	GW _{th}	14.17	67.9	101.9	102.2	271.6
	Million m ²	20.25	97	145.5	146	388
Solar Yield (ST energy production per year)	TWh/a	0.05	0.9	1.7	-	2.7

Figure 5 : Comparaison de scénarios européens 2020 pour le solaire thermique (BAU : business as usual, AMD : advanced market deployment, NREAP : national renewable energy action plan, RDP : full R&D and policy scenario) (source ESTIF, *Solar Thermal Markets in Europe*)

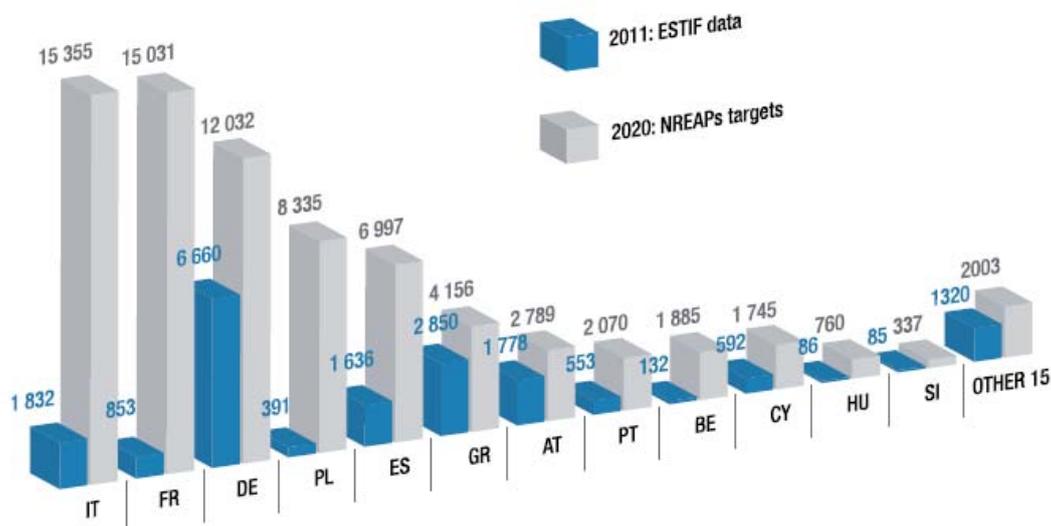


Figure 6 : Production annuelle de chaleur solaire par pays via les systèmes solaires thermiques, comparativement aux objectifs nationaux à l'horizon 2020 (GWh)

D'après l'étude « Potential of Solar Thermal in Europe » d'ESTIF le parc installé en 2050 en Europe varie entre 2 500 et 3 800 millions de m² selon les scénarios « Advanced Market Deployment » ou « Full R&D and Policy Scenario ».

En matière d'emplois (directs et indirects), l'Allemagne reste très largement en tête parmi les pays de l'Union Européenne. La répartition de ces emplois est une donnée intéressante, qui peut fortement varier d'un pays à l'autre : l'Allemagne ayant une répartition équitable des emplois entre la production, la distribution et l'installation (et maintenance), alors que la France compte avant tout des emplois dans la production de composants de systèmes solaires thermiques. Selon différentes études¹⁵¹⁶¹⁷¹⁸, on peut évaluer qu'il existe un emploi pour 80 m² de capteurs solaires produits, installés et maintenus.

¹⁵ « Solar Thermal Potential in Europe », ESTIF

¹⁶ Énergies renouvelables: un gisement de 75 000 emplois nouveaux d'ici 2010. Lettre du SER n°8, mars 2005

¹⁷ « Marchés, emplois et enjeu énergétique des activités liées aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique : Situation 2007-2008 – Perspectives 2009 », Octobre 2009

(<http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=7E6DB87B61B0C49AD27F03D0A9235F701259586175705.pdf>),

¹⁸ « Mémento des services publics urbains en France : Repères et chiffres-clefs » (auteur : Régis Meyer - 1 novembre 2003)

	2008		2009		Répartition des emplois Employment breakdown
	Puissance cumulée (en MWth) Cumulated capacity (in MWth)	Emplois (directs et indirects) Employment (direct and indirect jobs)	Puissance cumulée (en MWth) Cumulated capacity (in MWth)	Emplois (directs et indirects) Employment (direct and indirect jobs)	
Germany	7 914,9	17 400	9 029,9	15 900	30% manufacturing 35% distribution and marketing 35% installation and O&M
France	1 183,7	7 300	1 396,3	6 250	65% manufacturing 25% distribution and installation 10% O&M
Austria	2 775,0	7 400	3 031,0	6 200	40% manufacturing 30% sales 30% installation and O&M
Italy	1 131,2	5 500	1 410,4	5 000	30% manufacturing 70% distribution and installation
Spain	1 024,1	3 800	1 305,5	3 500	60% manufacturing 40% installation 10% O&M
Greece	2 709,1	3 500	2 853,3	3 000	n.a.
Poland	255,9	1 700	356,9	2 000	30% manufacturing 45% installation 25% O&M
Portugal	273,0	800	311,5	1 250	n.a.
Netherlands	492,5	590	542,0	970	35% manufacturing 65% distribution and installation
U. Kingdom	271,0	750	333,4	900	35% manufacturing 65% distribution and installation
Belgium	196,0	800	234,5	500	10% manufacturing 80% distribution and installation 10% O&M
Cyprus	466,0	600	490,5	500	n.a.

Manufacturing = production. Operation and maintenance (O&M) = exploitation et maintenance. Sales = ventes.
n.a. (not available) = non disponible.

Figure 7 : Emplois (directs et indirects) pour la filière solaire thermique dans les pays membres de l'UE
(source 10^{ème} bilan EurObserv'ER, édition 2010)

1.1.3. Monde

Au niveau mondial, fin 2010, la capacité totale estimée de capteurs solaires thermiques opérationnels est de 196 (GWth), équivalent à 280 millions de m² de capteurs. Fin 2009, on dénombre une capacité installée de 172.4 GWth (246.2 millions de m²), dans 53 pays. La Chine reste la première zone géographique en matière de capacité installée (58.9 % avec une puissance de 101.5 GWth), loin devant l'Europe (32.5 GWth) et les Etats-Unis et le Canada (15.0 GWth).

En considérant la surface installée pour 1 000 habitants dans les pays sus-mentionnés à fin 2012, les écarts sont quelque peu atténués avec les valeurs suivantes : Chine (84.8 kWth/1000h.), Europe (56.4 kWth/1000h.), Etats-Unis et Canada (5.1 kWth/1000h.), ces zones étant loin derrière le pays champion absolu qu'est Chypre (574.8 kWth/1000h.).

Par ailleurs, chaque zone géographique admet une certaine spécificité en termes de type de capteurs majoritairement installés : la Chine étant leader pour les capteurs à tubes sous vide, les Etats-Unis ont principalement installés des capteurs non-vitrés (« unglazed ») tandis que, pour l'Union Européenne, les capteurs plans vitrés (« glazed ») sont prépondérants.

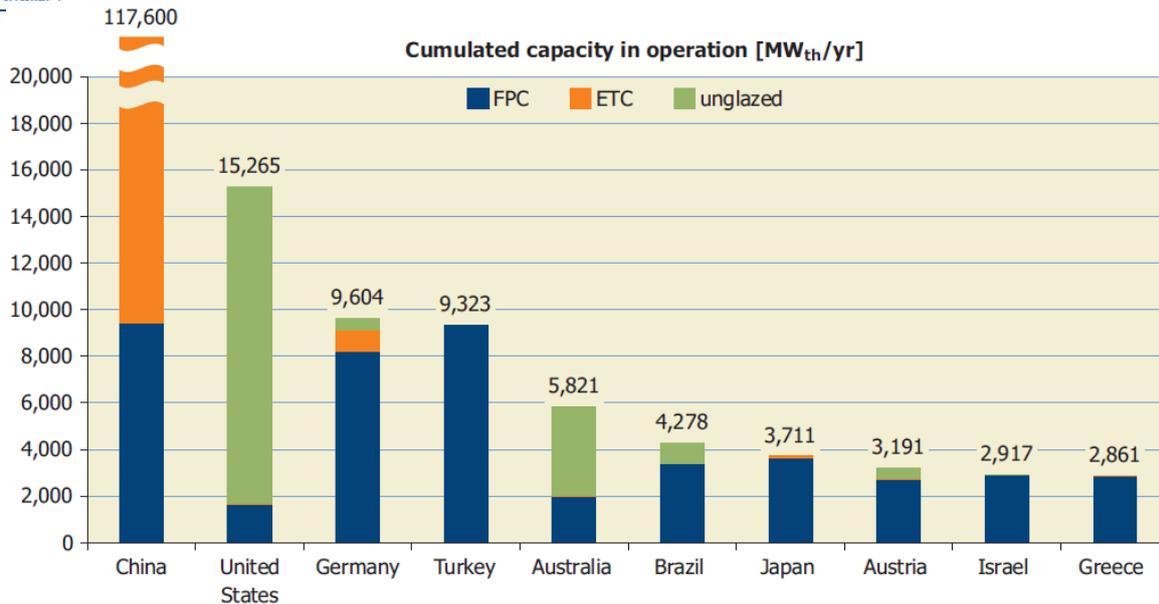


Figure 8 : Capacité totale de capteurs à circulation de liquide (FPC : capteurs plans vitrés, ETC : capteurs à tubes sous-vide, Unglazed : capteurs non vitrés) en opération dans les 10 pays leaders fin 2010
(Source Solar Heat Worldwide, Edition 2012)

Enfin, en matière de domaines applicatifs pour tous les systèmes installés opérationnels fin 2009 et ceux nouvellement installés, de fortes divergences existent selon la zone géographique ou pays concernés : les systèmes solaires combinés restant majoritairement implantés en Europe, tandis que les applications individuelles pour la fourniture d'eau chaude sanitaire (ECS) représentent au niveau mondial une part majoritaire. Cependant, pour les capacités nouvellement installées en Europe, on observe une répartition équilibrée entre systèmes solaires combinés, systèmes de production d'ECS pour l'individuel et le collectif.

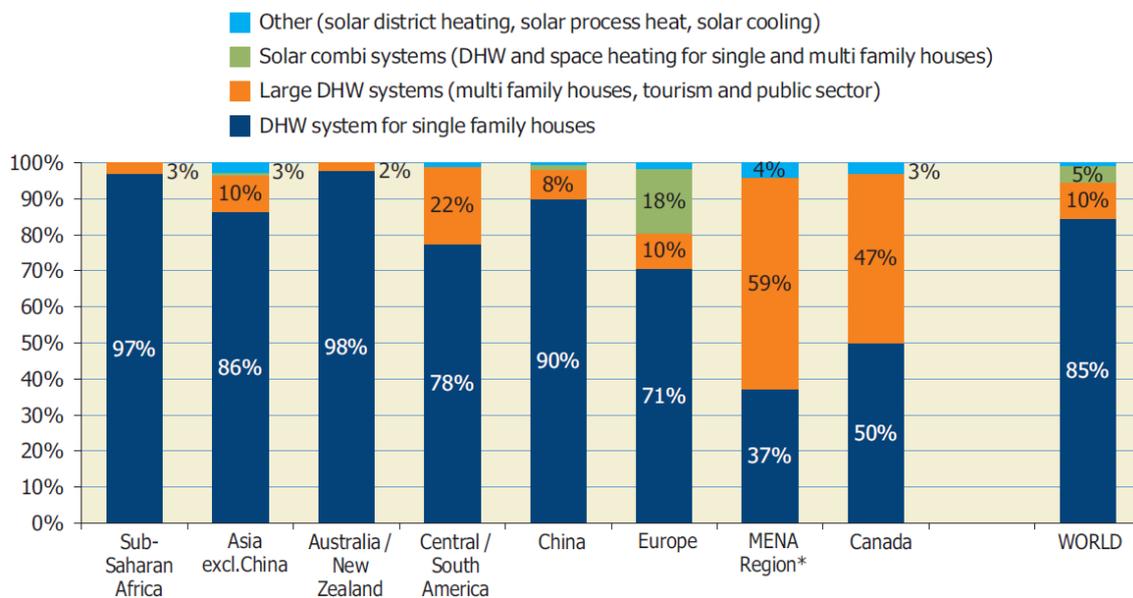


Figure 9 : Distribution (en surface de capteurs) des systèmes solaires thermiques par application pour la totalité des capteurs vitrés à circulation de liquide en opération fin 2010
(Source Solar Heat Worldwide, Edition 2012)

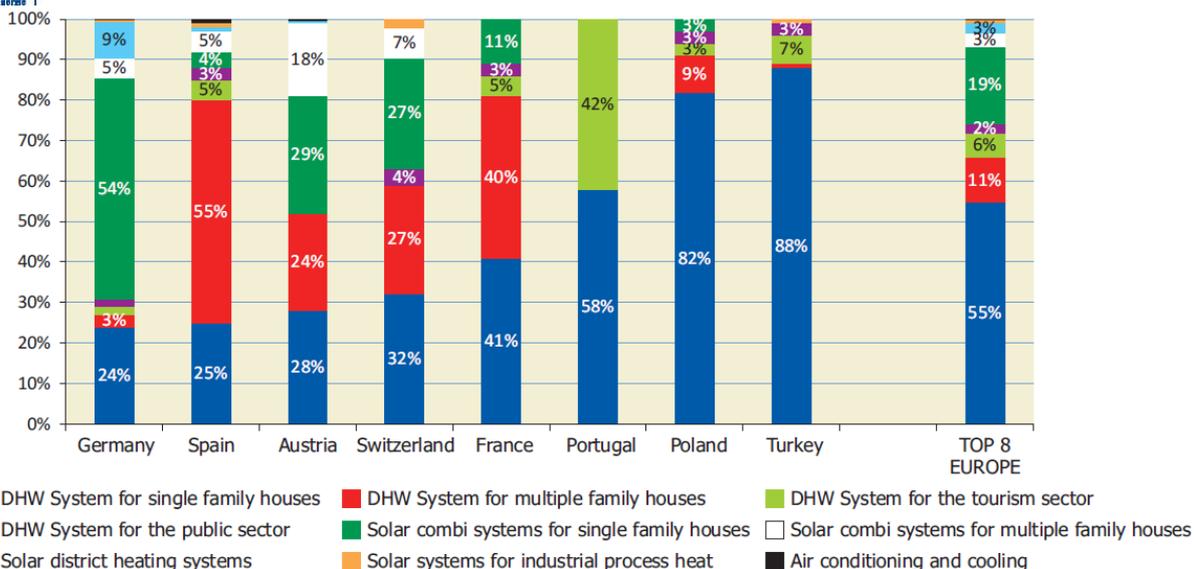


Figure 10 : Répartition (en surface de capteurs) des différentes applications des capacités nouvelles installées en 2010 de capteurs vitrés à circulation de liquide au sein des 8 pays leaders de l'Union Européenne (Source Solar Heat Worldwide, Edition 2012)

1.2. Demande énergétique

Les systèmes solaires thermiques répondent à un usage et à des besoins pour différentes applications. Leur conception et leur mise en œuvre doit avant tout tenir compte de cette donnée côté « demande ».

La qualification, puis la quantification, de l'évolution de la demande énergétique est alors nécessaire pour concevoir les systèmes qui devront y répondre prochainement et identifier les priorités de la filière solaire thermique.

Conformément à l'article 4 de la loi Grenelle 1, la RT 2012 (Réglementation Thermique 2012 qui sera généralisée à l'ensemble des bâtiments neufs au 1^{er} janvier 2013) a pour objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à un maximum de 50 kWh/(m².an) en moyenne, tout en suscitant :

- une évolution technologique et industrielle significative pour toutes les filières du bâti et des équipements,
- un très bon niveau de qualité énergétique du bâti, indépendamment du choix de système énergétique,
- un équilibre technique et économique entre les énergies utilisées pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.

Le secteur résidentiel représente 70 % des surfaces chauffées (2 300 millions de m²) ; comment se traduisent les objectifs du Grenelle de l'environnement en 2020 dans ce secteur ? Tous les **bâtiments neufs** sont à énergie positive. Poursuivre cette politique jusqu'en 2050 devrait aboutir à la construction d'environ six millions de logements neufs à énergie positive. Quant aux **bâtiments résidentiels existants**, un vaste programme de réhabilitation énergétique est engagé. Il concerne environ 400 000 logements par an d'ici à 2020. Il a pour objectif d'aboutir à des logements dont les

niveaux de consommation sont proches de 80 kWh/m²/an. Ainsi, sur la période 2010-2020, ce sont environ 4.4 millions de logements existants qui seront réhabilités. La poursuite de ce rythme de réhabilitation entre 2020 et 2050 reviendrait à rénover énergétiquement encore 12.4 millions de ce type de logements. Ce qui conduirait à 16.8 millions de logements existants réhabilités d'ici à 2050.

Bâtiments du secteur résidentiel	Objectifs du Grenelle à l'horizon 2020	Poursuite des objectifs du Grenelle entre 2020 et 2050
Bâtiments neufs	Tous les bâtiments neufs sont à énergie positive, soit entre 200 000 et 400 000 logements neufs à énergie positive en 2020	Environ 6 millions de bâtiments neufs à énergie positive sont construits entre 2020 et 2050. Ainsi, en 2050, environ 16% des logements seront à énergie positive
Bâtiments existants	Environ 4.4 millions de logements sont rénovés énergétiquement entre 2010 et 2020. La consommation énergétique moyenne de ces logements rénovés est inférieure ou égale à 80 kWh/m ² /an.	Environ 12.4 millions de logements seront rénovés entre 2020 et 2050, soit environ 16.8 millions de logements rénovés entre 2010 et 2050 (47% du parc de logements en 2050).

Source : Groupe d'experts pour la feuille de route sur les bâtiments et îlots à énergie positive et à bilan carbone minimum.

Cette évolution (et réduction) des consommations énergétiques au niveau des bâtiments est donc une donnée fondamentale pour imaginer le futur développement de la filière et des systèmes solaires thermiques.

Au-delà de la production d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments d'habitation, les différentes feuilles de routes publiées ces dernières années prévoient également une rapide extension de la production d'eau chaude dans l'industrie et dans les réseaux de chaleur.

En effet, ces secteurs présentent des avantages pour l'installation du solaire thermique. On peut citer :

- des procédés continus permettant d'atteindre des taux de couverture importants,
- un potentiel énergétique très important dans la plage de température concernée (inférieur à 90°C) permettant des baisses de coûts significatifs,
- du personnel à technicité élevée sur site permettant une exploitation/maintenance optimale,
- un moyen pour atteindre une plus grande indépendance énergétique

2. Périmètre de la feuille de route

2.1. *Champ thématique*

Le périmètre de la feuille de route couvre l'ensemble des technologies solaires thermiques potentielles pour :

- La production d'eau chaude sanitaire (ECS),
- Le chauffage,
- Le rafraîchissement,
- La production de chaleur à usage thermique final (pour des températures inférieures à 250 °C).

Les systèmes considérés dans le périmètre se distinguent par leurs champs d'application. Les différents secteurs applicatifs, avec leurs caractéristiques techniques propres, visés sont :

- Le résidentiel (individuel et collectif),
- Le tertiaire (bureau, hôtels, bâtiments publics,...),
- Les applications industrielles (procédés industriels ou agricoles consommateurs de chaleur),
- Les réseaux de chaleur.

L'objectif est de favoriser la conception, le développement et la mise en œuvre de systèmes répondant à des besoins énergétiques, environnementaux et économiques du marché et des utilisateurs.

La prise en compte du besoin doit guider les réflexions sur la conception et le déploiement de solutions solaires thermiques adaptées : à titre d'exemple, pour le secteur du résidentiel individuel ou collectif, des solutions différentes permettront de cibler aussi bien le neuf que l'existant, à la condition de quantifier précisément le besoin auquel elles doivent répondre.

Les systèmes, à considérer dans cette feuille de route, doivent proposer un taux de couverture solaire significatif ($\geq 50\%$ pour la production d'ECS et/ou $\geq 30\%$ pour le chauffage dans le cadre du secteur résidentiel) couplée à une productivité solaire utile significative ($> 350 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$ nord de la France, et $> 400 \text{ kWh/m}^2$ sud de la France) ; dans cet objectif, un gisement important d'innovation existe au niveau de l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière solaire thermique.

Pour la conception et le développement des technologies solaires thermiques, l'approche « système » est à privilégier pour évaluer précisément les spécifications attendues et en déduire des besoins en matière de composants innovants.

Dans cette approche, l'ensemble des étapes (conception/mise en œuvre/maintenance) et des composants (capteurs, fluides de travail, échangeurs, pompes, équipements de régulation, stockage,...) de la chaîne de valeur seront considérés, aussi bien sur des aspects énergétiques

(rendement,...), environnementaux (impact,...), économiques (compétitivité,...), industriels (emploi,...) et sociétaux (appropriation, intégration...).

Le périmètre de la feuille de route englobe donc l'ensemble des systèmes solaires thermiques, et notamment les différentes technologies de capteurs solaires connues ou à venir. L'objectif étant de cibler les solutions les plus à même de répondre économiquement et efficacement aux attentes et usages des clients ; il semble alors intéressant de laisser libre court à la conception et au développement de capteurs et de systèmes innovants ou en rupture comparativement aux solutions proposées actuellement.

Les analyses de cycle de vie des différentes solutions mises en œuvre sont un champ prépondérant pour s'assurer de la pertinence de ces systèmes. Le développement de ces outils, notamment via l'amélioration des données d'inventaire et des méthodes de caractérisation, est à considérer.

Par ailleurs, les dispositifs de certification (de produits), de garantie (de performance ou de fonctionnement) et de standardisation (pour un objectif d'interopérabilité des composants et des systèmes) font aussi partie des priorités.

Les dispositifs d'évaluation technique (certifications, avis techniques...) constituent une étape importante dans le processus de développement d'un produit (recherche, innovation, mise en œuvre...). Ils doivent trouver l'optimum (durée, coûts...) qui permettra de favoriser la qualité des produits dans un contexte d'un développement soutenu de la filière.

Enfin, la question du coût de la technologie solaire thermique, et plus largement du financement des solutions proposées, est un élément central à prendre en compte dans les différentes visions et dans les étapes clés qui doivent mener à leur déploiement massif.

2.2. Périmètre géographique

Le champ géographique privilégié dans le cadre de cette feuille de route est multiple à l'instar des types de systèmes solaires et des domaines d'application.

Dans un marché de forte compétitivité internationale avec des acteurs français qui visent aussi bien le marché national que l'export, les réflexions du groupe d'experts s'inscrivent dans une perspective de déploiement de dispositifs solaires à l'international (marchés de grande taille, zone géographique d'opportunité telle que l'arc Méditerranéen). Le périmètre mondial s'applique en premier lieu pour la vente et l'exportation de solutions technologiques et de systèmes packagés innovants. Selon la zone géographique ciblée, et donc le marché d'intérêt, le choix technologique peut fortement différer selon les contraintes économiques, environnementales et structurelles.

Parallèlement à cela, le déploiement massif de systèmes solaires thermiques passe nécessairement par la participation d'acteurs locaux, que ce soit pour les étapes d'installation, de suivi et de maintenance. Pour la construction d'une offre à l'export, il convient donc d'y associer les acteurs locaux des différentes zones visées.

Enfin, les stratégies françaises, les priorités de recherche et les besoins de démonstrateurs de recherche et préindustriel devront s'articuler avec les initiatives européennes en matière de recherche et de démonstration et notamment le NER¹⁹ 300, le SET Plan²⁰, les travaux/documents publiés par l'European Technology Platform on Renewable Heating & Cooling (ETP-RHC, Solar Panel), l'ESTTP (European Solar Thermal Technology Platform) et les travaux, au niveau international, de l'AIE (International Energy Agency) tels que les feuilles de route²¹ et son programme SHC (Solar Heating and Cooling)²². Au-delà de ces travaux, un regard sera porté sur les initiatives similaires portées par certains pays de l'Union Européenne en termes de structuration et d'accompagnement des actions de R&D : notamment l'Allemagne et l'Autriche à travers respectivement leurs plateformes R&D nationales collaboratives que sont le DSTTP²³ et l'ASTTP²⁴

2.3. Horizons temporels

Les visions de déploiement de la filière « solaire thermique » viseront l'horizon 2050, notamment pour être cohérentes avec l'objectif « facteur 4 »²⁵ et pour proposer des visions prospectives de développement de la filière. Cet horizon lointain permet d'imaginer des évolutions structurelles et organisationnelles de fond, qui nécessitent une mise en œuvre plus étalée dans le temps.

Cependant, l'atteinte de ces objectifs de long terme se joue à court et moyen termes *via* la mise en œuvre d'efforts particuliers de recherche, d'innovation et de structuration. Une vision à l'horizon 2020 doit permettre de mettre en évidence un certain nombre de verrous à lever et d'élaborer une phase à mi-parcours du déploiement de la filière ; cette vision s'appuiera sur les objectifs du Grenelle de l'Environnement et de la PPI Chaleur.

Les différents horizons temporels (court < 2020 ; moyen 2020-2030 ; long > 2030 termes) seront ainsi étudiés dans ce document ; des objectifs, associés à ces différents horizons, seront présentés afin de paver le chemin entre la situation actuelle, les objectifs du Grenelle de l'Environnement et les visions prospectives de long terme.

L'objectif est ici de mettre en évidence les éléments (technologiques, structurels, politiques publiques, économiques) qui permettraient aux solutions solaires thermiques de jouer tout leur rôle dans l'atteinte de ces objectifs énergétiques et environnementaux.

¹⁹ New entrance reserve.

²⁰ Strategic European Technology Plan.

²¹ Technology roadmap Solar Heating and Cooling – International Energy Agency, Juillet 2012 (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_SolarHeatingCooling_Roadmap_FINAL_WEB.pdf)

²² www.iea-shc.org.

²³ Deutsche SolarThermie Technologieplateform : <http://www.solarthermietechnologie.de/dsttp/>

²⁴ Austrian Solar Thermal Technology Platform : <http://www.solarwaerme.at/Forschung/>

²⁵ Le facteur 4 est un objectif issu de la loi POPE de 2005, qui vise à diviser par 4 les émissions françaises de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, par rapport à leur niveau de 1990.

3. Défis et enjeux de la filière « solaire thermique»

Le principal enjeu est d'atteindre les objectifs du Grenelle de l'environnement à l'horizon 2020 (23 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale) et le « facteur 4 » à l'horizon 2050. Il constitue le fondement des visions de déploiement, des priorités de recherche et des besoins de démonstrateurs de recherche et préindustriels.

Au-delà de cet enjeu « chapeau », la filière solaire thermique doit être en mesure de répondre à différents types d'enjeux (sans présomption de leur ordre d'importance).

3.1. Evolution, structuration et professionnalisation de la filière / Formation

Au-delà de la démarche industrielle, la filière et ses acteurs doivent participer activement à son renouveau, notamment en intégrant une réflexion « usage/demande » dans le but de mettre en œuvre des systèmes simples, efficaces et compétitifs, qui répondent à un usage/besoin précis de l'utilisateur. Cette démarche orientée « demande » semble trop peu répandue actuellement au sein de la filière et des différents types d'acteurs intervenant au cours de la chaîne de valeur. L'objectif de simplification des systèmes et de compréhension des attentes et besoins de l'utilisateur reste capital pour espérer une diffusion importante des solutions solaires thermiques.

A la vue des dysfonctionnements et du manque de fiabilité des installations solaires thermiques, aussi bien individuelles que collectives, l'ensemble des acteurs de la filière doivent évoluer afin de proposer des solutions énergétiques simples, fiables et compétitives. Cette notion de compétitivité se traduit par un investissement initial et des charges annuelles pour l'utilisateur (ou les utilisateurs) cohérents avec les économies observées.

Que ce soit pour favoriser la diffusion des technologies, assurer leur mise en œuvre ou pérenniser une activité aux échelles locales et nationales (voire internationales), le développement d'une filière, sur l'ensemble de la chaîne de valeur, est un défi/enjeu pour les différents acteurs potentiels. La chaîne de valeur couvre l'ensemble des activités de conception, de distribution, de mise en œuvre, de maintenance et de recyclage.

Le terme générique de filière englobe différents types d'acteurs et d'échelles géographiques :

- La filière industrielle en tant que tel, notamment sur les volets conception/recyclage, et qui peut avoir une activité à l'export,
- Une filière, beaucoup plus locale, notamment sur les aspects de mise en œuvre et de maintenance des systèmes solaires thermiques.

Loin d'être concurrente, ces deux familles d'acteurs de la filière doivent cohabiter et travailler en synergie pour favoriser le développement pérenne de leurs activités.

A l'instar de nombreuses filières innovantes, l'accompagnement, public et privé, de l'ensemble des acteurs pour s'assurer de la qualité et de la durabilité des solutions énergétiques mises en œuvre,

ainsi que la formation des professionnels (architectes, urbanistes, énergéticiens, professionnels du BTP, plombiers,...) seront déterminants pour l'atteinte des objectifs fixés et attendus.

Par ailleurs, dans une approche de participation active de la filière solaire thermique à la création d'éléments de construction multifonctionnels, il s'avèrera indispensable de renforcer les liens entre celle-ci et les autres filières du secteur du bâtiment (concernées par l'énergie ou dans le second œuvre).

3.2. Compétitivité / Application des technologies

La compétitivité reste l'enjeu majeur pour le solaire thermique. A l'instar de toute technologie innovante et en gain de croissance, cette question reste centrale et prépondérante pour favoriser la pénétration de l'énergie solaire thermique et le déploiement massif des solutions associées. Les gains en termes de compétitivité peuvent être vus :

- comparativement aux autres filières énergétiques, fossiles ou décarbonées (nucléaire et renouvelable) : ce facteur, augmentant l'attractivité des solutions proposées, pourrait placer le solaire thermique comme un substitut ou une solution complémentaire crédible, durable et économique des dispositifs classiques ou alternatifs,
- au sein même de la filière, en intégrant l'ensemble de la chaîne de valeur et donc de ses acteurs.

Pour atteindre un niveau de compétitivité suffisant, de nombreux leviers potentiels existent et peuvent être actionnés simultanément :

- L'innovation en matière de domaines d'application : élargissement de l'assiette des applications technologiques tout en s'assurant de la durabilité et de la pertinence des solutions proposées,
- L'amélioration de l'adaptation des systèmes solaires à l'existant et l'augmentation des usages : notamment pour la production d'ECS, cette amélioration pour les bâtiments existants est un enjeu primordial, en considérant non plus un système solaire et un appoint mais un système global de production de chaleur facile à intégrer dans le logement, la maison ou le bâtiment,
- Le potentiel d'hybridation des solutions développées ou de mutualisation des infrastructures nécessaires à la mise en œuvre,
- La baisse des coûts des systèmes installés, notamment grâce à leur simplification (montage en « kits plug and play », gestion, maintenance) et à leur packaging (systèmes préassemblés en usine par exemple),
- L'innovation en termes de modèles d'affaire et d'offres de financement pour faciliter l'accès et l'investissement des usagers pour des systèmes solaires thermiques,
- En lien avec le point précédent, la mise en place de garanties pour les systèmes proposés ne peut qu'accélérer et encourager l'investissement des usagers, et donc renforcer la pénétration de l'énergie solaire thermique dans le système énergétique,

3.3. Acceptation socioculturelle

Pour faire écho à l'enjeu de pénétration des systèmes solaires thermiques dans des systèmes existants ou neufs, l'acceptation socio-culturelle ou sociétale est un enjeu majeur pour favoriser et accompagner le déploiement massif de ces systèmes.

Dans cette démarche d'acceptation et d'appropriation des outils technologiques, l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur (architecte, professionnels BTP, installateurs, utilisateurs,...) doivent être mobilisés et sensibilisés. Différents outils et méthodes peuvent être mis en œuvre pour que les systèmes solaires thermiques soient perçus comme une solution pertinente, efficace et opérationnelle (voire esthétique) de production énergétique. Les actions d'information, de formation, de démonstration sont autant d'outils à multiplier dans cette dynamique de développement.

Que ce soit pour le résidentiel, le tertiaire ou les procédés industriels, les systèmes devront pouvoir répondre à un certain nombre d'exigences architecturales, techniques, esthétiques ; la conception de solutions innovantes doit donc parfaitement intégrer cette dimension et ces contraintes pour répondre précisément aux attentes et faciliter toute démarche d'acceptation.

3.4. Accroître l'indépendance énergétique par/pour la production de chaleur renouvelable

Dans un contexte de réduction des dépendances, de limitation des tensions autour des questions d'approvisionnement et de réduction des impacts environnementaux (notamment en matière d'émissions de gaz à effet de serre), les solutions solaires thermiques peuvent participer activement et significativement à l'atteinte de ces objectifs.

Nécessitant une ressource solaire disponible localement, le solaire thermique permettrait d'accroître l'indépendance énergétique par ET pour la production de chaleur renouvelable. D'autant plus que la filière présente un bilan environnemental positif²⁶. Bien évidemment, et pour tenir compte de l'ensemble des systèmes proposés, la filière doit être en mesure de proposer des solutions technologiques ne faisant pas appel à une ressource, actuellement ou prochainement, en tension. La notion d'indépendance doit s'appliquer à l'ensemble des composants et tâches de la chaîne de valeur.

²⁶ www.esthace.com

4. Visions prospectives

4.1. Paramètres clés

La construction de visions de long terme repose sur l'identification de paramètres clés. Ce sont des variables en mouvement dont on sait que l'évolution contrastée, au cours des prochaines années, aboutira à des visions radicalement différentes du déploiement des systèmes solaires thermiques à l'horizon 2050.

Parmi les différents paramètres discutés, deux familles de paramètres semblent de nature à influencer sensiblement le développement de la filière :

- ***L'intégration fonctionnelle des systèmes solaires thermiques,***
- ***L'intégration économique et structurelle de la filière dans la future offre énergétique.***

4.1.1. Intégration fonctionnelle des systèmes solaires thermiques

La conception et la mise en œuvre d'une installation solaire thermique doivent répondre à un besoin clairement identifié. Dans cet objectif, et pour optimiser les performances énergétiques et environnementales des systèmes proposés, l'intégration fonctionnelle est un paramètre prépondérant. Deux voies, qui peuvent être complémentaires avec des marchés bien spécifiques pour chacune d'elles, sont envisageables :

- l'intégration unitaire des systèmes solaires thermiques, qui équivaut à une réflexion usage par usage et qui limite les projets de mutualisation. Le système développé doit répondre à une attente du client (résidentiel, industriel,...) avec des contraintes énergétiques et économiques. Le marché majoritaire reste celui des systèmes individuels ou collectifs pour l'alimentation d'un bâtiment,
- l'intégration globale de ces mêmes systèmes qui se traduit notamment par l'extension du périmètre géographique de réflexion (quartiers, villes) ; les solutions solaires thermiques dépassent la frontière du bâtiment seul (modification de l'échelle d'intervention notamment dans l'interface systèmes solaires/bâtiments), des solutions mutualisés (entre bâtiments voire entre types de consommateurs) de stockage se développent pour optimiser la valorisation de l'énergie produite. Cette évolution favorise l'émergence de nouveaux modèles d'affaire et offres de services innovantes portés par des acteurs dédiés.

4.1.2. Intégration économique et structurelle de la filière dans la future offre énergétique

Le second paramètre qui risque d'impacter fortement les visions de déploiement est de savoir comment la filière s'intégrera dans les offres énergétiques à venir. On peut ainsi imaginer deux options différentes :

- une première évolution, que l'on pourrait qualifier de tendancielle, qui aboutit à une filière structurée et spécialisée sur le volet solaire thermique. Les acteurs ont développé des solutions innovantes pour l'ensemble des composants de la chaîne de valeur. Les projets de mutualisation (alimentation de réseaux, stockage mutualisé) restent intra-filière,
- à l'inverse, on peut assister à un développement rapide de filières diversifiées avec la participation d'acteurs multi-énergies qui seraient en mesure de proposer des solutions faisant intervenir différentes sources énergétiques renouvelables. Cette voie de développement est conditionnée à une interaction forte et une synergie entre filières.

4.2. Les visions 2050

Les visions prospectives ont vocation à décrire, parfois de manière caricaturale, les différentes modalités de déploiement des options technologiques, organisationnelles et socio-économiques. Ces visions n'ont pas la prétention de décrire ce que sera la réalité à l'horizon 2050, mais plutôt de définir le champ des possibles pour ensuite en déduire un large ensemble de verrous et de priorités de recherche.

La réalité quant à elle sera très probablement une combinaison (à différentes échelles ou structurelles) des visions 2050 établies par le groupe d'experts.

Les contextes économiques (national, européen et international) et géographiques peuvent fortement modifier chacune de ces visions ; en effet, selon la situation économique (période de crise économique ou a contrario forte croissance) ou la zone géographique (marché ciblé) considérée, les développements et choix technologiques pourront tendre vers des solutions à bas coût, à forte valeur ajoutée ou de pointe.

Le croisement des différents paramètres clés permet d'identifier des visions contrastées de l'évolution de la filière, qui toutes cependant sont susceptibles de répondre à la contrainte « facteur 4 ».

Visions de déploiement à long terme

Structuration de la filière / intégration économique	Filière (très) spécialisée	Filière diversifiée / Acteurs multi-énergies
Intégration fonctionnelle / Échelle d'intervention		
Déploiement par domaine d'application/usage	Vision 1 : Une solution solaire thermique adaptée aux usages	Vision 2 : Des systèmes renouvelables multi-énergies
Mutualisation forte	Vision 3 : Le solaire thermique, un service de production énergétique	Vision 4 : Le solaire thermique, acteur des réseaux thermiques du futur

4.2.1. Vision 1 : Une solution solaire thermique adaptée aux usages

Cette vision, que nous pourrions qualifier de « tendancielle » comparativement au marché actuel, combine une approche sectorielle avec une réflexion « par usage » : les solutions proposées devant répondre à un usage/fonctionnalité bien précise.

La filière et les acteurs contribuent activement à la conception et au développement de solutions solaires thermiques adaptées et qui répondent le plus précisément possible aux différents besoins des utilisateurs. Cette course en avant se traduit aussi bien par le développement de nouveaux capteurs et systèmes toujours plus performants (notamment sur les éléments critiques), que par la conception de systèmes à bas coût et d'offres pour répondre à une demande de solutions solaires thermiques pour tous et accessibles au plus grand nombre.

Chaque domaine d'application (résidentiel, tertiaire, applications industrielles), avec des besoins et des caractéristiques propres, motive le développement d'une solution technologique bien précise ; la conception de système avec un taux de couverture solaire thermique majoritaire (~80%) et à haut niveau de service est envisagée dans cette vision de déploiement de la filière.

Le développement de composants génériques (entre filières énergétiques) reste faible, hormis dans un objectif de réduction des coûts et de développement d'une offre de base.

Les différentes options de mutualisation et de partage d'infrastructures restent peu développées.

L'investissement se fait donc pour un système mono-fonctionnalité : au-delà des modèles d'affaire classiques où l'investissement reste porté par l'utilisateur, le développement d'offres de crédit-bail sur la production de chaleur (par un système solaire thermique) encourage et favorise la montée en puissance de la filière.

4.2.2. Vision 2 : Des systèmes renouvelables multi-énergies

A l'instar de la précédente vision, les solutions techniques développées répondent à un besoin bien précis, la conception et la mise en œuvre se fait pour un domaine d'application spécifique. Cependant, la filière a largement évolué, l'approche « filière » faisant place à une approche transversale multi-énergie avec l'émergence d'acteurs qui sont en mesure de proposer des solutions hybrides. Dans ce cadre là, on entend par systèmes hybrides des systèmes qui fournissent de la chaleur, du froid, de l'eau chaude sanitaire voire de l'électricité par association de deux, ou plus, sources renouvelables d'énergie dans un système commun ; cette association permettant de dépasser les limites de chacune des technologies prise individuellement.

Cette évolution structurelle de la filière se traduit par son insertion dans une architecture plus complexe ; la conception et la mise en œuvre de systèmes hybrides, faisant appel à différentes filières énergétiques renouvelables, sont un point clé dans le déploiement de ces nouvelles solutions énergétiques. Le marché majoritaire reste la production de chaleur (chauffage et/ou ECS) à l'échelle du particulier, voire d'un bâtiment.

Le solaire thermique participe donc à la fourniture de chaud et de froid en complémentarité d'autres solutions énergétiques. Les systèmes renouvelables multi-énergie (solaire thermique, biomasse, géothermie, photovoltaïque) se développent massivement. Cette évolution demande cependant de

fortes avancées en matière d'interopérabilité entre systèmes pour que ces hybridations puissent fonctionner efficacement.

Le financement de ces solutions individuelles reste majoritairement du type « investissement en propre par le particulier » ou « offre de crédit-bail ». Comme mentionné plus haut, un arbitrage peut être fait entre des développements technologiques de pointe, et donc à forte valeur ajoutée, et des offres à bas coût pour rendre accessible au plus grand nombre ces systèmes hybrides.

4.2.3. Vision 3 : Le solaire thermique, un service de production énergétique

L'approche filière reste de mise dans le cadre de cette vision de déploiement ; cependant, et notamment en quête de nouveaux marchés, de domaines d'application et de solutions mutualisées, l'intégration fonctionnelle des systèmes solaires thermiques est globale.

La filière reste spécialisée et centrée sur le solaire thermique (les acteurs multi-énergies restent minoritaires et peu développés).

La réflexion pour l'implantation des systèmes et les échanges de chaleur (ou de froid) se fait au-delà d'un unique bâtiment, de nombreuses solutions d'agrégation (à différentes échelles) se développent pour optimiser la valorisation de l'énergie produite ; cela favorisant également la valorisation économique du projet et des installations. Dans ce cadre, on assiste à un déploiement important de solutions mutualisées, moyenne et grande échelle, de stockage thermique : ces solutions peuvent s'implanter aussi bien au sein d'un ensemble de bâtiments résidentiels que d'un îlot énergétique.

Les systèmes solaires thermiques participent à l'alimentation des réseaux de chaleur et de froid (réseaux qui peuvent, pour optimiser la valorisation de l'énergie produite, alimenter parallèlement des zones résidentielles et des zones industrielles fortement consommatrices en chaleur et/ou de froid).

Pour bénéficier d'effets d'échelle, le froid solaire vise particulièrement les applications industrielles ; cependant, et notamment dans une perspective de déploiement de réseaux de froid à destination des secteurs résidentiels et tertiaires, le froid solaire touche de nouveaux secteurs applicatifs.

Pour permettre cette évolution de la filière, de nouveaux acteurs (intégrateurs, agrégateurs), au sein de la filière solaire thermique, émergent. Ils participent à la mise en œuvre de contrats de fournitures (modèles d'affaire type « offre de services ») et d'offres de financement ou d'investissement innovants. Ces opérateurs ont en charge le dimensionnement, l'installation, l'exploitation, la maintenance et le recyclage des solutions solaires thermiques.

4.2.4. Vision 4 : Le solaire thermique, acteur des réseaux thermiques du futur

Dans la continuité de la vision précédente, l'intégration fonctionnelle des solutions techniques est globale et transverse pour les différents domaines d'application. De façon complémentaire, l'offre énergétique se fait également via des acteurs multi-énergies ; par écho à l'émergence des systèmes électriques intelligents, on assiste à l'émergence et au déploiement de systèmes de production/gestion de chaleur « intelligents » dans lesquels les solutions solaires thermiques jouent un rôle prépondérant (au côté des autres filières énergétiques renouvelables productrices de chaleur/froid).

Cette vision est le résultat d'une hybridation des systèmes de production de chaleur et de froid, d'une réflexion multi-échelle (liée à l'émergence des îlots énergétiques) et d'une participation modulable de chacun des acteurs.

Des solutions inter-opérables et communicantes sont conçues et accompagnent le déploiement massif de solutions hybrides. Les synergies de réseaux sont largement développées pour gagner en flexibilité et optimiser la valorisation de chaque tep produite. La production énergétique via la filière solaire thermique participe au pilotage des réseaux et propose un certain nombre de services aux réseaux pour assurer son fonctionnement et son efficacité.

Pour le financement, différents modèles d'affaire coexistent : « offres de services », « tiers investisseur » ou « investissement en propre » (acteur public ou privé, seul ou regroupé).

Les acteurs multi-énergies, qui interviennent à différentes échelles selon le système considéré, participent à la gestion du système énergétique (chaleur et froid) et contribuent à l'investissement pour les infrastructures. Des groupements de particuliers (îlot, bâtiment) peuvent s'afficher comme opérateurs multi-énergies. L'utilisateur signe un contrat de fourniture ou, a contrario, est un acteur, actif, à part entière du système énergétique.

4.3. La vision moyen terme 2020

A l'horizon 2020, la production énergétique issue des installations solaires thermiques participe majoritairement à l'alimentation (chaud et froid) du résidentiel. Différentes évolutions incrémentales ont permis à la filière d'atteindre les objectifs, fixés par le Grenelle de l'Environnement, aussi bien pour l'individuel que pour le collectif.

La filière et ses acteurs ont fortement évolué pour être en mesure de proposer des systèmes solaires thermiques adaptés aux attentes et besoins des utilisateurs, fiables et compétitifs ; l'approche globale « système » étant bien intégrée par l'ensemble des acteurs dans cet objectif de conception et de mise en œuvre de solutions efficaces. La simplification des installations, un dimensionnement adéquat des systèmes, une maintenance efficace et pointue, une synergie entre les différents acteurs de la chaîne de valeur sont les évolutions clés de la période 2013-2020.

Ces évolutions ont permis de réduire le coût du kWh solaire entre 50% et 80%⁽ (voir section 1.1.

Filière solaire thermique) quel que soit la zone géographique et le site d'implantation considérés. Toutes les installations sont équipées d'un système de contrôle-commande²⁷ et de monitoring afin de permettre un suivi dans le temps des performances, une réduction drastique des coûts d'exploitation/maintenance (corrective) et un comptage précis des kWh produits pour des moyennes et grandes installations spécifiques.

L'installation de systèmes solaires thermiques, compétitifs, efficaces et éventuellement en association avec d'autres systèmes énergétiques, dans le résidentiel neuf et au cours des étapes de rénovation des bâtiments sont les deux voies qui ont été privilégiées et qui ont permis d'augmenter significativement la part du solaire thermique dans la production énergétique renouvelable ; l'application de la réglementation thermique 2012 ayant notamment contribué à une importante mise en œuvre d'installations individuelles dans le neuf.

La réduction notable des coûts a été observée aussi bien pour les composants que pour les différentes étapes liées à l'installation, à la maintenance et au suivi.

Côté composants, l'utilisation de matériaux innovants, la conception de systèmes moins contraints, une production à plus grande échelle des composants sont autant de pistes d'évolution qui ont permis une réduction de l'ordre de 40% des coûts de fabrication des composants principaux des systèmes solaires (capteurs, ballons, ensembles hydrauliques, structures de pose, régulation).

Pour les étapes d'installation, de mise en œuvre et de maintenance, une réduction des coûts de l'ordre de 60% a été permise en agissant sur différents facteurs techniques, organisationnels et structurels : la diminution des frais d'installation pour atteindre ceux pratiqués dans les pays voisins de la France, la simplification des schémas hydrauliques, la réduction des temps de pose en lien avec les progrès de packaging (préfabrication), la hausse de la robustesse et de la qualité des systèmes.

Bien que minoritaires dans la production énergétique globale, de nouveaux domaines d'applications émergent et pourraient à moyen terme se développer notablement (à la condition d'être

²⁷ Contrôle-commande = système permettant de contrôler et de commander en continu l'ensemble du système

énergétiquement ET économiquement viable) : les applications industrielles (chaud et froid), ainsi que l'alimentation de réseaux de chaleur et de froid sont des paramètres et des éléments importants dans cette vision à moyen terme.

Une évolution notable, dans le cadre du financement des installations, est la transition effectuée entre un système dont l'accompagnement est basé sur la capacité installée vers un système orienté énergie utile produite : les différents mécanismes financiers d'accompagnement et de financement des systèmes se basent sur la vente de kWh ou sur les kWh économisés, et non plus sur les kW installés. Cette évolution est permise par la mise en place obligatoire de dispositifs de monitoring des systèmes. Les notions de « kWh utiles produits garantis » et de « kWh économisés » sont devenues des références pour le dimensionnement, la mise en œuvre et le financement des installations solaires thermiques.

5. Les verrous

Les verrous sont les éléments contextuels qui freinent l'atteinte des visions définies à moyen (2020) et long (2050) termes. Ce sont des points de blocage importants, qui doivent être levés pour accompagner le développement de la filière. Ils sont de nature politique, socio-économique, technologique, organisationnelle ou réglementaire et peuvent apparaître séparément ou conjointement. Leur identification résulte de l'analyse de l'environnement de la filière solaire thermique. En conséquence, nous avons classé les verrous, qui pourraient susciter des besoins de recherche-développement et démonstration, en verrous technologiques et non-technologiques. Afin de viser l'exhaustivité, il semble opportun de balayer l'ensemble de la chaîne de valeur de la filière et de mettre en lumière les verrous propres à chaque étape.

L'identification de verrous est une étape préliminaire et permet par la suite une traduction en priorités de recherche à différents horizons de temps.

5.1. Verrous technologiques

Afin de ventiler les verrous technologiques, la chaîne de valeur de la filière solaire thermique est décomposée selon les étapes suivantes :

- **Conception/fabrication**
- **Installation**
- **Fonctionnement/exploitation**

Certaines de ces étapes, et d'autres telles que la distribution, seront considérées pour décrire les verrous non-technologiques.

5.1.1. Conception/fabrication

Verrou 1.1 : **Coût / performance / durabilité des systèmes solaires thermiques et par conséquent de leurs composants :**

Ces variables sont prépondérantes pour le développement et le déploiement massif des systèmes solaires thermiques. Dans un objectif de forte pénétration dans le bouquet énergétique, les solutions proposées doivent avant tout être intéressantes des points de vue économique et énergétique : les coûts relativement importants des installations et les performances variables restent des verrous à lever à court terme (optimisation conjointe coût-performance-durabilité).

Verrou 1.2 : **Matériaux utilisés et développés :**

Que ce soit pour les capteurs, les solutions de stockage ou tout autre élément des systèmes, les matériaux actuellement utilisés ont des propriétés limitatives et restent des verrous pour l'amélioration des performances énergétiques (traitement de surface au sens large pour les

capteurs, matériaux spécifiques pour parer aux phénomènes de surchauffe, aux déperditions de la chaleur par le le stockage et le bouclage notamment,...), environnementales et économiques.

Verrou 1.3 : Ressource en matières premières / sécurité d'approvisionnement :

Les systèmes solaires thermiques, de par leurs composants, font appel à de nombreuses matières premières, certes largement répandues, mais dont la demande, au niveau mondial, pour d'autres secteurs engendrent des phénomènes de renchérissement durables (Cuivre par exemple). La disponibilité et l'approvisionnement de celles-ci sont des enjeux pour les années à venir et pourraient être un verrou bloquant, donc structurant, pour le déploiement de nouvelles solutions énergétiques.

Verrou 1.4 : Intégration au bâtiment de systèmes solaires thermiques :

Le dimensionnement, la conception et l'intégration au sein du(es) bâtiment(s) (individuel, collectif et tertiaire) sont des points essentiels et qui restent peu pris en compte dès les étapes de conception et de fabrication : cette intégration recouvre les aspects à la fois architecturaux, mais également techniques. Le capteur solaire thermique n'est que très peu employé pour une autre fonction que sa production énergétique.

Verrou 1.5 : Intégration aux réseaux (réseaux de chaleur et/ou smart grids)

A l'heure actuelle, les interactions avec les réseaux sont peu (réseaux de chaleur) ou pas (smart grids) développées. A un horizon moyen terme, les systèmes conçus (et notamment le stockage) devraient pouvoir interagir et participer à la gestion de réseaux intelligents.

5.1.2. Installation

Verrou 2.1 : Durée et complexité d'installation des systèmes :

La majeure partie (hormis les CESI) des systèmes consiste en un assemblage sur site de composants multiples et variés, qui entraîne à la fois une durée de mise en œuvre importante, une complexité d'installation et un risque de pénaliser les performances. La pose d'un CESI représente en moyenne 4 homme-jour²⁸, durée importante par rapport à d'autres produits, ce qui impacte le coût installé d'un CESI.

Verrou 2.2 : Multi-compétences requises pour l'installation :

Les étapes d'installation font appel à plusieurs corps de métiers (plombier, couvreur...) qui ne sont pas nécessairement réunis au sein d'une même entreprise. Ce besoin en compétences multiples complexifie les différentes étapes et accentuent le risque de défauts ou de mauvais fonctionnements sur l'installation finale.

²⁸ Homme-jour = unité de mesure correspondant au travail d'une personne pendant une journée

Verrou 2.3 : Besoins importants en matériaux (en plus du système à proprement parler) liés aux pratiques usuelles lors des opérations d'installation des systèmes solaires thermiques (tuyauterie notamment), impactant le bilan économique ou environnemental final du projet :

Les habitudes d'installation, les modes de commercialisation peuvent bloquer le recours à des solutions techniques plus performantes et moins onéreuses.

5.1.3. Fonctionnement/exploitation

Verrou 3.1 : Coût de fonctionnement et fiabilité des opérations de contrôle et de maintenance :

S'agissant encore de technologies peu répandues, les bonnes pratiques pour les étapes de contrôle et de maintenance (qui doivent être minimum et optimisées afin de garantir la rentabilité économique du système) ne sont pas encore acquises ; il en résulte soit des coûts très élevés soit des lacunes pour ces opérations ; dans tous les cas, cela contribue à réduire la performance économique des systèmes solaires thermiques.

L'absence de suivi local ou à distance (télé suivi) augmente en général les coûts de fonctionnement.

Verrou 3.2 : Gestion de la production de chaleur :

Ponctuellement, des conditions particulières peuvent amener à une surproduction de chaleur pour un système donné, et qui peut éventuellement se traduire par une surchauffe du système ou de ses composants. Au cours des différents cycles d'utilisation, cette surchauffe répétée des fluides ou matériaux peut fortement détériorer les performances et la durabilité de ces systèmes.

Dans cette gestion de la chaleur, l'adéquation avec la charge (en tenant bien évidemment compte de son évolution) à laquelle doit répondre le système, est un point critique qui conditionne la réussite de l'installation.

Verrou 3.3 : Suivi, supervision, comptabilisation de l'énergie produite :

A ce jour, très peu de systèmes solaires thermiques individuels mesurent et communiquent directement à leurs propriétaires le nombre de kWh utile consommé, comme le fait l'onduleur dans une installation solaire photovoltaïque pour le nombre de kWh injecté sur le réseau électrique. Pour les systèmes solaires collectifs, l'ADEME via le Fonds Chaleur, oblige la mise en place d'un monitoring simplifié (manuel ou télé-relevé selon la puissance thermique de l'installation), qui garantit seulement le fonctionnement ou non de l'installation, et prévient (alerte) de la nécessité de mettre en place une opération d'entretien curatif.

Au-delà de cette obligation, seulement quelques contrats de supervision pour le suivi du bon fonctionnement des installations (comptabilisation de l'énergie produite - pas forcément de l'énergie « utile », comparaison au productible théorique), voire de Garantie de Résultat Solaire, existent.

Des dispositifs de suivi détaillé de la production d'énergie solaire utile, fiables et économiques, sont nécessaires pour permettre la mise en place d'opérations de surveillance préventive et pour s'appuyer sur de nouveaux modèles d'affaire (basés sur les kWh solaires utiles produits ou kWh économisés), voire de nouveaux dispositifs incitatifs (tarif d'achat).

5.2. Verrous (non-technologiques) à caractère juridique, organisationnel, réglementaire et socio-économique

Verrou 4.1 : Dispositifs pour favoriser/garantir la qualité des systèmes installés et la qualité de leur installation

D'une manière générale, les procédures d'évaluation (certification, avis techniques...), démarches volontaires, permettent à deux niveaux :

- soit de garantir une performance d'un équipement (produit - exemple : SK capteur, système - exemple : NF CESI)
- soit de garantir un certain niveau de qualité d'un procédé **mis en œuvre** (exemple : CSTBat capteur). Cela ne garantit pas la compétence et l'expérience de l'installateur, et donc in fine la qualité de la réalisation, mais cela garantit un partage des responsabilités entre le fabricant et l'installateur en cas de sinistralité.

Les procédures d'évaluation de premier niveau, euro-compatibles, sont souvent reprises pour l'octroi des aides d'Etat (CIDD, CEE,...). Elles garantissent à minima la qualité des systèmes installés. Les procédures d'évaluation du deuxième niveau, intégrant la mise en œuvre (exigences essentielles pour l'Europe), et pouvant servir à garantir la qualité des installations, ne peut être rendue obligatoire à cause des pratiques « métiers », aujourd'hui nationales, qu'il faudrait harmoniser au niveau européen.

Une possibilité de valider la qualité des systèmes installés, démarche encore une fois volontaire, est le contrat de supervision du bon fonctionnement de l'installation. Hormis la GRS²⁹ en équipement collectif de production d'eau chaude sanitaire, mais qui reste à ce jour appliquée uniquement à quelques centaines de systèmes en France et reste peu efficace dans les faits³⁰, trop peu d'outils ou de dispositifs (juridique, réglementaire) garantissent l'installation de systèmes adaptés, leur (bon) fonctionnement et leurs performances énergétiques.

Verrou 4.2 : Inadaptation des supports et procédures pour accompagner et faciliter l'innovation :

²⁹ GRS : Garantie de résultats solaires : la GRS se traduit par un engagement des opérateurs techniques du projet: fabricant de capteurs solaires, installateur et exploitant, assistés du bureau d'études. Ils garantissent conjointement pendant 3 à 5 ans un niveau minimal de fourniture annuelle de kWh thermiques d'origine solaire. Durant cette période, la production réelle de l'installation doit être au moins 90 % de la production calculée. Le non-respect de cet engagement entraîne le paiement d'indemnité compensatoire au client.

³⁰ Dans la majorité des cas de dysfonctionnements, la GRS n'est pas appliquée en raison de procédures complexes à mettre en œuvre et d'une non reconnaissance des fautes potentielles.

Les procédures pour accompagner l'innovation se jouent à deux niveaux (produit et procédé mis en œuvre) mais elles nécessitent de passer par un organisme tiers indépendant (bureaux de contrôle, centre d'essais). Elles sont aujourd'hui nombreuses, comme : l'Etude en Techniques Nouvelles, le Document de Technique d'Application pour la mise en œuvre de produit marqués CE, le PASS Innovation, l'Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX), l'Avis Technique,... Les délais sont plus ou moins longs selon l'innovation présentée, et le « domaine d'emploi » envisagé par le demandeur : de l'opération unique visée pour démontrer de la faisabilité de l'innovation au document générique pour « encadrer » un ensemble d'applications visées par le demandeur. Des passerelles de reconnaissance existent entre ces différentes procédures, par les organismes qui les proposent.

Des dispositifs existent aussi au niveau européen et sont à disposition des fabricants/installateurs, comme l'Euro-agrément ou l'Agrément Technique Européen (ATE). Les procédures sont très longues dans ce contexte européen (3 à 5 ans). C'est un vrai verrou sur lequel un travail devrait porter pour, à terme, viser une harmonisation possible des normes de mise en œuvre des procédés solaires thermiques dans l'espace communautaire afin de garantir la qualité des systèmes installés.

Le verrou juridique et réglementaire impacte directement la responsabilité des acteurs dans la chaîne de valeur, et l'assurabilité de l'ouvrage exécuté. Il faudrait évaluer les possibilités de simplifier le processus d'accompagnement.

Verrou 4.3 : Qualification des professionnels

Actuellement, une forte disparité de qualification existe entre les professionnels qui interviennent au cours des étapes :

- de conception (les systèmes et composants conçus doivent s'adapter aux personnes et aux besoins, et non l'inverse)
- de fabrication de composants et de systèmes adaptés (pour faciliter l'installation et garantir un fonctionnement optimal)
- d'installation (incluant pose, raccordement, puis mise en service).

Ce manque de qualification ne favorise pas le déploiement de solutions optimisées, fiables et adaptatives. Il peut fortement pénaliser les performances et la durabilité des systèmes installés. On observe toutefois une augmentation des bonnes pratiques pour les systèmes individuels au travers des audits Qualisol. La directive européenne traduite au niveau français par le « Reconnu Grenelle de l'Environnement », applicable à partir du 1^{er} Janvier 2013 dans les états membres, est un premier outil. Un vrai manque se fait ressentir encore sur la conception / maîtrise d'œuvre et l'exploitation.

Verrou 4.4 : Formation des acteurs de la construction et de la rénovation :

Les caractéristiques des systèmes solaires thermiques restent très mal connues des acteurs potentiellement actifs dans la chaîne de valeur. Ainsi, et plus généralement pour l'ensemble des énergies renouvelables, les architectes et/ou maîtres d'œuvre restent peu formés et

sensibilisés à ces systèmes et à leurs caractéristiques propres. Pour la maîtrise d'ouvrage, peu de documents ou de boîtes à outils sont disponibles pour les informer et les accompagner sur une démarche de mise en œuvre d'un système solaire thermique.

Verrou 4.5 : Modèles d'affaire proposés et investissement initial pour les différents types de systèmes solaires thermiques :

Les modèles d'affaire et modes d'investissement actuels sont des points fortement discriminants et rendent difficilement accessibles les systèmes à l'ensemble de la population. Le développement de modèles de financement innovants est un point capital dans une stratégie de déploiement massif de ces systèmes. Ces modèles d'affaires doivent être adaptés aux cibles de déploiement visées (petits systèmes vs grands systèmes, individuel vs bailleurs sociaux vs industrie, ...) et doivent offrir de nouveaux modes de financement accessibles au plus grand nombre. Pour l'émergence de tels dispositifs, la mise en œuvre d'une vérification métrologique adaptée, fiable (et donc incontestable) reste un des principaux verrous.

Les modèles d'affaires, s'ils s'appuient même partiellement sur des dispositifs incitatifs, doivent lever les deux verrous principaux actuels inhérents à l'aide : visibilité sur le long terme de ces dispositifs, facilité de gestion du dispositif incitatif sur la durée.

Verrou 4.6 : Intégration (paysagère) au bâtiment :

L'implantation et l'intégration de capteurs au niveau du bâtiment (toiture, façade) restent, dans certains cas, difficiles à prévoir pour des raisons de non-conformité, d'absence d'avis technique ou d'autorisation d'urbanisme. Peu de réflexions portent sur une possible cohabitation entre dispositifs solaires et contraintes architecturales ou d'urbanisme (réglementation de la construction, sites classés, monuments historiques).

Verrou 4.7 : Transparence de la valeur économique de la chaleur à l'échelle territoriale

La chaleur reste une donnée territorialisée avec une valorisation qui doit se faire à une échelle majoritairement locale. Dans cette optique, il convient de s'intéresser à l'échelle territoriale au coût de la chaleur produite. Malgré l'apparition d'indicateurs depuis 2008, les modes de calcul restent peu transparents et difficilement utilisables par l'ensemble des parties prenantes.

Verrou 4.8 : Flou sur la terminologie et les notions énergétiques :

En particulier sur les notions touchant à la mesure de la performance (solaire utile, taux de couverture, besoin, fraction solaire, taux d'économie d'énergie...), les différents logiciels et les différents acteurs de la filière ne mettent pas tous, loin s'en faut, la même chose derrière ces mots ; ceci aboutissant à de nombreuses déconvenues et dysfonctionnements pour les systèmes solaires thermiques installés.

6. Les priorités de recherche

La feuille de route n'étant pas destinée à orienter les seules actions de l'ADEME, les besoins de l'ensemble de la chaîne de développement (de la recherche amont jusqu'au déploiement commercial) sont répertoriés, qu'ils soient d'ordre technologique, scientifique, réglementaire ou sociétal.

Selon leur degré de maturité, les actions à mettre en œuvre pourront porter sur :

- de la **recherche amont** : fondamentale et/ou exploratoire ;
- de la **recherche industrielle** : finalisée, complétée par le développement expérimental de briques technologiques ;
- du **développement pré-industriel** permettant, en conditions réelles, à échelle réduite ou réelle, la validation de technologies innovantes. Elles peuvent porter sur une ou un ensemble de briques technologiques : c'est le rôle des démonstrateurs de recherche, de l'expérimentation et du prototypage préindustriels ;
- du **déploiement commercial** : cela commence avec la première unité de production et suppose une faisabilité technico-économique, un plan d'affaires, des études d'impacts ;
- de la **régulation d'un marché existant et mature** : cela concerne les dispositifs à mettre en œuvre pour garantir la qualité dans le temps des produits commerciaux puisque le solaire thermique est un objet commercial à longue durée de vie.

Un certain nombre de recommandations ont été tirées des réflexions du groupe d'experts afin d'orienter les travaux à conduire.

Les orientations de recherche pour les technologies solaires thermiques s'adressent aussi bien à des problématiques d'intégration, d'efficacité et de durabilité des systèmes, de matériaux utilisés, de coût, de durée de vie, ainsi qu'à des aspects réglementaires, organisationnels et financiers.

Les priorités et actions de R&D, décrites ci-dessous, couvrent aussi bien les aspects technologiques (système et composant) et non technologiques :

- le volet système cible la production de chaleur pour l'ECS ou le chauffage, la production de froid solaire et les systèmes à grande échelle,
- le volet composant couvre les capteurs solaires thermiques, le stockage thermique, le contrôle/commande et le monitoring,
- le volet non technologique s'intéressera aux problématiques de qualité, de garantie, d'ingénierie financière et celles socio-économiques.

Des objectifs chiffrés et des horizons de temps associés peuvent être précisés pour les priorités ci-dessous ; ceux-ci doivent tenir compte et rester cohérents avec l'atteinte des objectifs nationaux et européens à court et moyen termes. Par ailleurs, pour visualiser le chemin restant à parcourir, un état de l'existant est associé à chaque objectif.

6.1. Priorités technologiques : volet système

6.1.1. ECS / Chauffage (hors réseaux de chaleur et process industriels)

Les développements et priorités de recherche sur la thématique ECS / chauffage se répartissent en 3 catégories distinctes :

- Améliorer la balance coût / bénéfice,
- Favoriser l'intégration esthétique et technique (comme éléments de construction par exemple) des systèmes solaires thermiques au niveau de l'enveloppe du bâtiment,
- Développer la conception de systèmes combinés, adaptés aux bâtiments et aux zones climatiques d'implantation, et qui permet d'atteindre des taux de couverture solaire allant de 50% (bâtiments existants) à 100% (bâtiments neufs)³¹.

Priorités de recherche	Etat de l'existant	Objectif / Horizon de temps
Réduction des coûts	17 à 60 c€/kWh ³²	2015 : 12 - 40 c€/kWh 2020 : 8 - 30 c€/kWh
Développement / commercialisation de systèmes packagés intégrant des développements « composant » (dont isolation des piquages, systèmes anti thermosiphon de toutes les connexions, isolation des vannes, raccord, purgeurs, ... débitmètres et sondes pour le suivi de performance)	CESI en kit, mais peu de standardisation pour les équipements collectifs ou les SSC	2020 : 100 % de solutions packagées pour les CESI et les SSC ; 80% de solutions packagées pour l'ECS collective
Gestion de la surproduction de chaleur et de la surchauffe (pendant la stagnation)	Solutions prématurées, coûteuses et faiblement répandues pour limiter les endommagements	2020 : - 100 % des systèmes (et donc composants) qui résistent aux pics de température. Une partie des systèmes permet de limiter la montée en températures (ex : autovideangeables)
Optimisation des coûts d'entretien/de maintenance (transition d'une maintenance curative récurrente et onéreuse vers une maintenance curative exceptionnelle et des actions de surveillance planifiées)	300-500€/an environ pour la partie solaire (équipements collectifs)	2020 : maximum 10 % des économies annuelles

³¹ A noter : en 2020, les très faibles consommations de chauffage des bâtiments neufs pourraient justifier la non installation de SSC

³² Plage STC et CESI

Amélioration de l'efficacité à long terme des systèmes solaires thermiques	Selon les données, ~ 40-60% des installations satisfont individuellement le ratio annuel suivant : énergie utile mesurée égale à celle classiquement garantie (80% de l'énergie théorique)	2020 : - système installé : valeur de la garantie de performance - système à 10 ans : 90% des caractéristiques initiales - système à 20 ans : 80 % des caractéristiques initiales
Augmentation des taux d'économie d'énergie pour les systèmes SSC	30% en moyenne	2020 : 50% en moyenne
Disposer de solutions économiquement viables permettant d'avoir des installations 100% solaires pour l'ECS et le chauffage	Aucune solution à part quelques maisons « laboratoires »	2020 : quelques solutions existent mais restent limitées à des niches de marchés 2030 : plusieurs solutions existent et le marché s'ouvre
Conception d'outils, évaluation des performances des systèmes solaires thermiques hybridés actuels (pompes à chaleur, chaudières biomasse) et packaging de ces offres	Offre restreinte et peu de retours sur les systèmes existants	2015 : campagne d'évaluation des systèmes hybridés 2020 : mise à disposition d'un référentiel/base de données pour l'ensemble des technologies existantes
Développement de la simulation au cours des protocoles de certification de composants et/ou systèmes innovants dans l'optique d'en réduire les coûts et les délais	Déjà appliqué par la NF CESI et SK system pour les CESI Coût de certification pour un CESI pouvant aller jusqu'à 10 % du coût du système	Réduire les coûts de certification jusqu'à un niveau de l'ordre de 1 à 2% du coût du système

6.1.2. Froid solaire

Les systèmes de production de froid solaire sont quasiment systématiquement réversibles et sont utilisés également de façon complémentaire en production de chaleur (chauffage et ECS). La taille de l'application visée, et donc de la puissance du système, peut conditionner la faisabilité technique et économique des différentes technologies de production de froid à base de chaleur. Ainsi, pour chacune d'elles, les coûts atteignables, dans une vision système, sont un facteur primordial et doivent être étudiés avec précaution en amont de projets de recherche ambitieux.

Priorités de recherche	Etat de l'existant	Objectif / Horizon de temps
Amélioration des performances (optimisation de la régulation, développement de solutions de rejet de chaleur économes en énergie, développement de circulateurs spécifiques, sélection de schémas de principe vertueux et standards) / réduction des coûts du kW froid	COP _{el} ³³ trop faibles (~3-7 selon la puissance) dus aux consommations des auxiliaires / peu d'innovations	2015 : COP _{el} > 10 pour le système entier 2020 : COP _{el} > 15 pour le système entier
Conception et design de solutions packagées et solutions faciles à installer pour les moyens à grands systèmes, réduction des coûts du kW froid	Systèmes conçus et installés à façon, niveau de coûts 3 000 à 5 000 €/kW	2020 : systèmes packagés à moins de 2 000 €/kW froid pour 100 kW froid et moins de 3 000 €/kW pour 15 kW froid
Evolution / optimisation des outils d'aide à la décision pour les bureaux d'études et systémiers (logiciel de prédimensionnement, outil réglementaire)	Outils au stade de la R&D	2015 : mise à disposition de versions de base, à implémenter et optimiser par leurs soins (BE,...) selon leur retour d'expérience
Intégration des systèmes (dont stockage compact) dans l'enveloppe du bâtiment	Offre inexistante et peu de retours sur les systèmes existants	Offre fiable disponible en 2025-2030

6.1.3. Applications des systèmes à grande échelle

La taille et les caractéristiques de l'application visée, l'évolution de la demande énergétique au cours des prochaines années sont autant de paramètres qui conditionnent la faisabilité technique et économique de ces systèmes, notamment la synergie entre systèmes solaires thermiques et réseaux de chaleur. En amont de projets ambitieux, il convient donc de quantifier précisément les objectifs visés, la finalité d'une telle association et ainsi d'en vérifier la pertinence énergétique sur le long terme.

Priorités de recherche	Etat de l'existant	Objectif / Horizon de temps
Systèmes grande échelle pour l'alimentation de réseaux de chaleur	Pas de réalisation en fonctionnement en France pour le moment	2020 : Coût de production équivalent au coût de production via les énergies conventionnelles
Définition de solutions standardisées pour l'intégration du solaire dans les réseaux de chaleur et disponibilité de kits ou sous-ensembles (exemple des sous-stations avec réinjection du solaire)	Pas de standard existant	2020 : Définition d'un standard

³³ COP_{el} = coefficient de performance électrique = quotient « énergie thermique restituée / énergie électrique consommée »

Définition de solutions standardisées pour l'intégration du solaire dans les procédés industriels avec différenciation sur la production d'eau chaude ou de vapeur	Pas de standard existant	2020 : Définition d'un standard
Concevoir / optimiser des outils de calculs appropriés aux réseaux de chaleur et aux procédés industriels	Outils au stade de la R&D	2015 : mise à disposition de versions de base, à implémenter et optimiser par leurs soins (BE,...) selon leur retour d'expérience
Conception/mise en œuvre d'outils de régulation et de gestion de ces systèmes pour assurer un fonctionnement optimal des systèmes installés	Pas de solutions	2020 : Plusieurs dispositifs à disposition des acteurs

6.2. Priorités technologiques : volet composant

6.2.1. Capteurs solaires thermiques

Les besoins et priorités de recherche sur les capteurs visent quatre objectifs bien précis :

- accroître les performances à coût décroissant,
- simplifier et améliorer les étapes d'installation et d'intégration,
- améliorer in fine la durabilité des systèmes,
- disposer de produits adaptés aux différentes applications (performances, taille...).

Priorités de recherche	Etat de l'existant	Objectif / Horizon de temps
Surfaces, traitements, revêtements, matériaux, design des capteurs, procédés de fabrication innovants, techniques de pose pour un gain en performance et réduction des coûts	Coût d'un champ de capteurs fourni posé de 600 €/m ²	2020 : réduction de 50% des coûts (à performance identique voire supérieure)
Fabrication (échelle industrielle) de capteurs solaires pour des applications industrielles et climatisation solaire double effet (100-250°C)	Peu d'acteurs à l'heure actuelle en France	2020 : disposer de plusieurs solutions permettant d'atteindre un coût du kWh de 8 c€/kWh.
Disposer de capteurs solaires adaptés aux différentes applications et aux différentes solutions d'intégration au bâtiment (enveloppe multifonctionnelle). Développer des mécanismes standardisés de soutien associés		2015 : Disposer d'un dispositif réglementaire incitatif pour l'intégration solaire thermique dans l'enveloppe du bâtiment 2020 : Façade solaire thermique avec surcoût par rapport à une façade standard vitrée de moins de 10% 2030 : l'enveloppe active remplace les enveloppes conventionnelles

Développer des systèmes de montage et de fixation standardisés peu onéreux et facile à installer (y compris leur certification au niveau européen)	Pas de standards	2015 : existence d'une norme 2020 : plus de 80% de part de marché pour un système de montage standardisé, facile, rapide à monter
Développer des systèmes de raccordement hydrauliques et de plomberie peu onéreux et surtout standardisés et simples à raccorder	Pas de standards	2020 : plus de 80% de part de marché pour un type de raccord standard
Développement d'une technologie hybride (PV-T) économiquement viable et énergétiquement pertinente ; optimum global à trouver (en raison d'optima différents en surface et inclinaison pour ces deux utilisations du rayonnement solaire)	Pas de solutions à l'heure actuelle	2020 : des solutions standardisées et performantes existent

6.2.2. Stockage thermique

<i>Priorités de recherche</i>	<i>Etat de l'existant</i>	<i>Objectif / Horizon de temps</i>
Développement de matériaux et de systèmes de stockage thermique compact (notamment matériaux à changement de phase, de sorption et thermo-chimiques) à bas coût et respectueux de l'environnement	Pas de solutions de stockage haute densité disponible sur le marché	2020 : densité effective de stockage > 200 kWh/m ³ (150 kWh/m ³ système de stockage entier) avec un coût du kWh stocké < 20 c€/kWh en individuel 2030 : densité > 300 kWh/m ³ (250 kWh/m ³ système de stockage entier) avec un coût du kWh stocké < 15 c€/kWh en individuel
Améliorer les rendements énergétiques, réduire les déperditions thermiques	Pertes thermiques mesurées ~ double des pertes théoriques	2020 : réduction de 50% des déperditions (systèmes de stockage/ballons raccordés)
Conception de technologies de stockage long terme	Pas de solution disponible pour l'individuel	2030 : stockage thermique sur 6 mois avec un rendement ~ 80% (individuel)
Intégration de solutions de stockage thermique dans des éléments de construction (dont le développement de solutions de stockage distribuées)	Pas de solutions à l'heure actuelle	2020 : des solutions standardisées et performantes existent

Intégration dans les stockages thermiques d'éléments permettant la compatibilité avec les réseaux intelligents (smart grid)	CESI à appoint joule compatibles (au même niveau que les chauffe-eau électriques à accumulation)	2020 : tous les stockages équipés d'appoint joule seront compatibles avec les réseaux intelligents (smart grid)
Développement de kits standardisés de raccord et d'application (mitigeur ECS, échangeur de chaleur, pompes...), standardisation des symboles des raccords	Kits divers disponibles, souvent peu optimisés au niveau des pertes et des erreurs de montage	2015 : symboles et descriptif standardisés 2020 : intégration de la performance des accessoires dans la mesure de la performance des systèmes

6.2.3. Contrôle/commande et suivi

Il a pu être observé que le contrôle/commande reste un point faible des installations solaires thermiques en général. Un effort doit être consacré à cette problématique pour disposer d'algorithmes de contrôle/commande performants à même d'assurer en continu l'optimisation du fonctionnement et la recherche de la minimisation de la consommation d'appoint. De plus, ces algorithmes doivent aboutir à une fiabilité dans le temps absolue et à une observation simple du comportement de l'installation.

Le suivi, la supervision et la comptabilisation de l'énergie produite par le système solaire thermique sont des verrous, précédemment identifiés, à lever rapidement. Il convient donc de développer et d'améliorer les outils nécessaires pour assurer le plus fidèlement possible ces étapes à un coût raisonnable, et permettre la mise en place de nouveaux mécanismes de financement et de garantie. L'intégration de ces systèmes de comptage des usages et de l'évaluation de la performance ou du bon fonctionnement du système peut être élargie pour d'autres énergies renouvelables ou conventionnelles.

Priorités de recherche	Etat de l'existant	Objectif / Horizon de temps
Concevoir des systèmes avec une instrumentation embarquée, simple d'utilisation et pour un faible coût ; améliorer les outils de monitoring adaptés aux systèmes, ainsi que leurs fonctionnalités et leurs coûts.	Monitoring non systématique et non intégré	2015 : 100% des installations neuves collectives équipées et 10% des installations individuelles 2020 : taux d'équipement > 80% (toutes installations confondues) pour des faibles coûts (< 2% des coûts d'installations)

Etablir des schémas de suivi ou télésuivi pour le collectif (acquisition, analyse, envoi des données, réaction sur défaut), travailler sur le niveau de surveillance et la forme de garantie selon la taille des installations et l'application visée	Télésuivi existant mais encore peu répandu et onéreux	2015 : les règles de suivi sont définies avec un coût acceptable et 50% des installations collectives sont suivies ou en télé suivi 2020 : toutes les installations sont équipées
Disposer de solutions optimisées de contrôle/commande, intégrant notamment le monitoring, la surveillance du fonctionnement, les couplages des énergies et des usages. Ces solutions doivent être adaptées aux différentes applications. Dans tous les cas, le facteur coût doit être optimisé.	Plusieurs régulateurs en cascade ne favorisent pas l'optimisation des performances	2020 : 100% des systèmes disposent d'un suivi intégré ; les coûts restent négligeables (~ 2% des coûts totaux)
Composants de métrologie standardisés et entièrement adaptés au comptage/mesure de l'énergie des systèmes solaires (spécificités chaufferie, liaison physique ou non entre capteur et régulateur...)	Peu ou pas de composants spécifiques et à bas coût par absence de standard	2015 : -20% sur le poste métrologie de mesure 2020 : -50% sur le poste métrologie de mesure
Développer la notion de « protocole ouvert » pour faciliter l'intervention et l'échange de données entre différents opérateurs au cours du temps	Pas d'interopérabilité fonctionnelle à l'heure actuelle	2015 : les règles d'interopérabilité sont définies 2020 : toutes les installations sont équipées de systèmes à « protocole ouvert »
Conception/développement de fonctions innovantes (auto-adaptation des paramètres de réglage...)	Pas de solutions diffusées à l'heure actuelle	2025-2030 : tous les systèmes installés sont équipés
Développement de solutions de contrôle-commande spécifiques aux réseaux intelligents (smart grid)	Gestion de l'appoint Joule des CESI via contacteur Heure Creuse	2020-2025 : Pilotage dynamique de l'appoint Joule via l'infrastructure de compteurs communicants ou de passerelle locale

6.3. Priorités non-technologiques

Au-delà des priorités technologiques, des actions doivent être menées pour notamment répondre aux verrous non-technologiques identifiés précédemment. Pour répondre aux priorités ci-dessous et atteindre les objectifs fixés, un travail conjoint entre acteurs (publics et privés) de la filière est indispensable, notamment pour la mise en œuvre de ces actions.

	Priorités de recherche	Etat de l'existant	Objectif / Horizon de temps
Standards / normalisation	Définition de normes, de standards et de schémas de certification (intégrant les méthodes de simulation) pour un développement durable du marché (composants, systèmes, conception, mise en œuvre, suivi)	Avis Technique pour les capteurs et CESI, DTU révisé, pré-normalisation avec RAGE NF CESI et SK system pour les CESI	2015 : certification CESI incluant une base de simulations, UNE certification globale 2020 : - certification pour les SSC - schémas de certification pour l'ECS collective
	Favoriser la participation aux travaux sur les standards européens	Les instituts et industriels payent pour participer	A minima : 1 représentant de la recherche, 1 représentant pour la certification et 1 représentant industriel
Garantie / acceptabilité	Imposer un monitoring intégré des installations et un suivi des performances local et/ou à distance	Système de monitoring non standardisé et onéreux	2020 : l'équipement devient un standard pour toutes les installations
	Améliorer l'adhésion et l'appropriation des systèmes par le consommateur ; faciliter l'accès aux coûts des différents systèmes disponibles et aux aides accordées	Système d'information disponible, mais manque encore de visibilité pour le consommateur	2015 : site Internet/plate-forme d'information dédiée et facilement accessible
	Mise en place d'une certification de l'ouvrage (système + installation + monitoring + contrat de suivi) pour améliorer leur qualité	Pas de certification d'ouvrage en solaire thermique	2015 : 50% des nouvelles installations individuelles et collectives certifiées 2020 : 100% des nouvelles installations individuelles et collectives certifiées
	Développement / mise en œuvre de dispositifs opérationnels de garantie de performances ou de bon fonctionnement pour l'ensemble des systèmes solaires thermiques	- Xna/suivi simplifié (manuel ou télérelevé) Fonds Chaleur (collectif) - Télésuiweb comme garantie de bon fonctionnement (individuel et collectif) - GRS dans le collectif	2020 : tous les systèmes sont soumis à une garantie de bon fonctionnement et une garantie de performances (y compris CESI, SSC)
	Encadrer étroitement le niveau de qualité de la filière froid/chaleur solaire afin de ne privilégier que les solutions optimisées au niveau économique (configurations spécifiques, bâtiment adapté à la technologie de par ses besoins)	Programme Emergence (ADEME/ Enerplan)	2015 : Label/norme internationale encadrant la qualité des systèmes

Accompagnement / soutien	Améliorer le niveau de formation des acteurs de la filière (BE, industriels, exploitants, entreprises d'installation, architectes, promoteurs, assureurs, banquiers, élus...) ; mise en œuvre de mécanismes d'incitation/d'obligation à une formation initiale ou une formation continue	Formations existantes non systématiquement unifiées et insuffisantes	2014 : Mise en place d'un référentiel reconnu (installation et maintenance) au niveau national et obligation de formation suivant celui-ci, notamment pour les installations collectives et les SSC. Obligation de certification des BE pour réaliser une installation.
	Rédiger et mettre à disposition de l'ensemble des acteurs concernés (bailleurs, investisseurs, particuliers,...) des fiches/boîtes à outils d'autocontrôle et d'aide à la réception des systèmes solaires thermiques	Non disponible à l'heure actuelle	2015 : des fiches/boîtes à outils d'autocontrôle et d'aide à la réception sont diffusées et leur disponibilité communiquée
	Renforcer les actions de recherche en privilégiant les échanges internationaux, la participation à des projets collaboratifs européens et en facilitant la contractualisation entre R&D et entreprises	Faible soutien national dans les actions de la R&D vers l'international	Adaptation des dispositifs incitatifs en fonction de la taille du partenariat, mesures fiscales, exonération avec contrat d'engagement favorisant l'innovation
	Rendre périodiques et structurés les échanges entre industriels et centres de R&D par la création d'un forum collaboratif technologique national (sur l'exemple de la DSTTP allemande)	Pas de structure ad-hoc	2013 : création d'un forum collaboratif technologique solaire thermique 2015 : Forum collaboratif technologique solaire thermique pérennisé
	Mettre en place des mécanismes de soutien qui prennent en compte la performance des installations ; pérenniser sur le long terme les mécanismes de soutien et prévoir leur évolution afin d'engager des réductions de coûts prévisibles et objectives (cap/corridor)	Le fonds chaleur et le CIDD ne ciblent pas assez la performance	2016 : La performance est la cible principale des dispositifs de soutien, sur la base des kWh utiles produits.
Modèles d'affaire	Développement de modèles d'affaire innovants (vente du kWh économisé, tiers investisseur, prêt à taux zéro...)	Quelques projets utilisent ce modèle d'affaire	Plusieurs modèles d'affaires existent pour la chaleur solaire en 2015 et ont été testés
	Développement de modèles d'affaire spécifiques aux réseaux de chaleur	Aucun modèle d'affaire n'est disponible	Plusieurs modèles d'affaires existent pour les réseaux de chaleur en 2020
	Poursuivre les travaux sur l'étiquetage de la performance énergétique, notamment grâce au comptage embarqué	Pas d'étiquette énergétique disponible pour le moment	Étiquette énergétique mise en place sur les CESI et SSC en 2015 (cf. directive européenne sur l'étiquetage énergétique)

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche – www.ademe.fr

