

L'impact opérationnel d'un dispositif de stockage thermique par MCP sur un réseau de chaleur

Le cas d'une chaufferie biomasse collective

Stéphane La Branche, Antoine Tabourdeau

Introduction

La remise en question contemporaine de nos ressources et de nos consommations d'énergies est liée à des évolutions dans la manière de produire et de consommer l'électricité en France et dans le monde. Ces évolutions sont liées à deux crises majeures : le changement climatique et ses impacts sur notre civilisation et la hausse des prix de l'énergie. Pris ensemble, ils constituent un défi de coordination fondamental. En effet, pour sortir de la crise énergétique – ou en retarder l'apparition – il serait aisé de simplement recourir au charbon, par exemple, mais en raison des effets locaux et sur les émissions de gaz à effets de serre, la transition énergétique vise au passage aux énergies renouvelables qui nécessiteront le stockage d'électricité ou de chaleur pour leur développement à grande échelle.

En effet, ceux-ci pourraient contribuer à la stabilité des réseaux, au lissage de pointe et à compenser le prix élevé de l'énergie lors de ces pointes qui sont enfin également liées au recours aux énergies fossiles pour faire face à la demande. Le gestionnaire du réseau haute tension d'électricité en France, RTE, estime qu'en hiver, notamment du fait de la forte importance du chauffage électrique en France, une baisse d'un degré Celsius de la température lors du pic de consommation journalier de 19h, entraîne une hausse de 2 300 Mégawatts (MW) de consommation, soit l'équivalent de

la puissance injectée de deux réacteurs nucléaires¹. Ces pics de consommation posent plusieurs problèmes. La France devient importatrice d'électricité alors que les capacités des lignes exportatrices sont limitées et que ces périodes correspondent, bien entendu, à des périodes de consommation élevée pour les voisins. La surconsommation d'électricité lors des périodes de pointe fait également peser un risque de panne, dans la mesure où il peut être tout simplement impossible de répondre à la demande d'électricité. Enfin, ces pics de consommation entraînent la mise à feu des moyens de production les plus polluants, notamment le charbon.

Tout concourt pour que le stockage de chaleur, plus simple techniquement et plus prêt de la diffusion de masse que le stockage d'électricité, se généralise d'ici quelques années à la fois dans le tertiaire et le résidentiel. Nous relevons cependant des freins potentiels à cette diffusion : il faut que le stockage de chaleur soit techniquement performant pour valoir le coût de son développement et de son installation – et de sa maintenance ; il faut que le stockage soit socialement acceptable dans le

1. Entretien avec M. P. de Ladoucette, président de la CRE, et de Jean-Yves Olivier, directeur général, par la Commission des affaires économiques du Sénat, le 7 Mars 2012, entretien mené par M. Gonzalez. *L'impact des politiques de libéralisation sur le développement des smart grids en Europe*. Mémoire de M2, Master de Science Po Grenoble, 2014.

résidentiel et en site industriel – ceci pose deux ensembles des questions différentes – et enfin ; il faut que ce stockage soit intégré dans un ensemble énergétique – dans le résidentiel, un ensemble énergétique à domicile. L'on peut parier qu'éventuellement, les moyens de stockage seront intégrés directement et dès l'amont dans les projets de construction des nouveaux quartiers ou ilots, voire dans les projets de rénovation urbaine.

Mais insistons sur un point : les attentes (et les promesses) à l'égard du stockage de l'énergie – électricité et chaleur- sont **potentielles**, car elles dépendent de plusieurs facteurs, dont l'acceptation et l'appropriation des acteurs – ménages, développeurs, occupants industriels et tertiaires, agrégateurs d'énergie, architectes et producteurs d'énergie.

Malgré la place octroyée dans les discours aux pratiques et aux valeurs, très peu de recherches en sciences humaines et sociales sont aujourd'hui disponibles sur les niveaux et les modalités d'acceptabilité de ces innovations technico-énergétiques. On peut avancer quatre raisons principales à cette carence scientifique :

- l'énergie en soi n'est devenue une question, un enjeu dans le sens environnemental du terme, que depuis peu,
- la sociologie ne se penche que depuis peu sur les questions énergétiques de manière sociotechniques et le stockage est insuffisamment développé pour ne pas encore mériter d'attention,
- les technologues ne sentaient que peu concernés par les enjeux socio-comportementaux d'acceptabilité de l'énergie, plaçant les enjeux sociaux comme des problèmes à résoudre en dernier, par les acteurs politiques et les SHS,
- la technique est conçue comme étant un sujet de recherche pour les sciences de l'ingénieur et peu « abordables » pour les sciences sociales, mise à part la sociologie des usages, un champ mineur d'étude pour cette discipline.

Il s'agit ici d'étudier l'installation d'un démonstrateur de stockage de chaleur, fonctionnant selon la technique de matériau à changement de phase (MCP).

En répondant à l'une des sept ambitions stratégiques pour la France (*le stockage de l'énergie*), définis par la Commission Innovation 2030 (présidée par Anne Lauvergeon), le projet de R&D SETI, *pour Stockage d'énergie thermique intelligent*, porté par l'ETI française IDEX en partenariat avec le CEA-Liten, a été lauréat au Concours Mondial d'Innovation.

L'objectif du moyen de stockage SETI est de permettre le lissage des pics de charge du réseau et d'offrir en parallèle la possibilité d'arbitrer et d'optimiser en temps réel les différentes sources de production, afin de valoriser pleinement les sources d'énergies renouvelables thermiques et électriques. Dans le cadre du projet, le déphasage entre la production et la consommation offert par l'intégration d'un moyen de stockage sur une chaufferie biomasse permettra un gain de rentabilité grâce à une augmentation du taux de couverture en bois et une diminution du recours au gaz.

Pour parvenir à cet objectif, la conception innovante du SETI reposera sur plusieurs ruptures technologiques :

- un MCP, pourvu d'une densité énergétique élevée (100 kWh/m³), à un coût maîtrisé,
- un système de mesure de l'état de charge embarqué et connecté, pour informer le gestionnaire et l'utilisateur,
- un couplage à l'énergie électrique, pour faire de l'effacement électrique quand les coûts le justifient.

Nous avons analysé au cours d'une étude l'impact de l'installation d'un démonstrateur sur le site d'une chaufferie biomasse alimentant un réseau de chaleur urbain dans une agglomération moyenne. Sur un tel site industriel, plusieurs facteurs jouent potentiellement un rôle :

- les objectifs énergétiques de l'entreprise et du commanditaire,
- la culture institutionnelle,
- la structure hiérarchique,
- l'image publique de l'entreprise,
- son identité,
- l'insertion technique dans le travail quotidien.

À partir de ce cas d'étude, l'objectif de cet article est de présenter les changements provoqués par l'introduction d'un tel dispositif de stockage sur les acteurs, ingénieurs,

techniciens, responsables de son exploitation mais aussi les modalités de son acceptabilité et de son insertion dans un dispositif pré existant. En effet, si les SHS sont souvent convoquées pour évaluer l'acceptabilité de dispositifs sur le grand public, les travaux entrepris depuis une trentaine d'années convergent pour montrer que l'acceptation d'une innovation se joue dès sa conception et pas seulement en aval, au moment de sa mise en service, alors qu'une grande partie des choix décisifs ont été effectués. Cela explique dès lors le malaise des SHS vis-à-vis des études dites d'acceptabilité et l'appel de plusieurs auteurs à analyser l'acceptabilité à toutes les phases de la conception. Dès lors, la réception du stockage par les acteurs chargés de son exploitation constitue une étape clef dont l'étude permet de saisir l'imbrication du dispositif avec des réseaux à la fois techniques, économiques, politiques et sociaux et d'améliorer les chances de succès de son installation.

1. Une brève présentation de la sociologie de l'énergie

La sociologie en général et celle de l'énergie en particulier, s'intéresse depuis plusieurs décennies aux questions de l'acceptabilité des projets d'infrastructures et même énergétiques (barrages, centrales nucléaires) et plus récemment, depuis quelques années, à une panoplie d'enjeux et de thèmes directement liées à l'énergie et au climat : *smart grids*, écologie, valeurs, sobriété, mobilité, rénovation des bâtiments, comportements d'achats, organisation des institutions².

Pour notre part, nous distinguons ici la gestion, la sobriété et l'efficacité énergétique de la manière suivante. La dernière renvoie à la technique : par exemple, un sèche-linge efficace permet d'obtenir un résultat égal avec moins d'énergie consommée. La gestion de l'énergie est facilitée par les *smart grids* et les nouvelles technologies : dans quels créneaux horaires puis-je le mieux utiliser mes postes de

consommations ; puis-je maîtriser mon chauffage à distance ? À noter que la gestion fait appel à des technologies mais ne mène pas nécessairement à la sobriété, même si elle peut, potentiellement, y participer. La sobriété renvoie aux pratiques de consommation : étendre le linge plutôt que le mettre au sèche-linge, mettre un couvercle sur la marmite ou réduire la température moyenne de chauffe... Confondre les trois notions signifie ne pas pouvoir déterminer si la diminution de la consommation est causée par un changement de comportements – la sobriété – plutôt qu'à la gestion de l'énergie. Si la distinction est fine, elle est fondamentale en ce qu'elle implique des impacts profonds sur :

- la capacité des ménages à modifier leurs pratiques énergétiques,
- l'ampleur et les limites des gains énergétiques des offres de services (effacements, offres tarifaires et stockage éventuel en habitat) qui, si elles offrent potentiellement des gains importants, se retrouvent réduits dans leurs promesses par les freins à la sobriété et à une gestion optimale de l'énergie.

Ce que nous mettons en exergue ici, ce sont les interactions entre technologies, énergie et usages. L'insertion des nouvelles techniques, méthodes ou comportements énergétiques peut se heurter à des freins « imprévus » à son appropriation. Ces imprévus le sont seulement pour ceux qui ont une vision « naïve » qui a renvoie à une vision technocratique top-down, qui met la technique au-dessus du social. L'outil technique a été conçu pour un objet précis et si celui-ci fonctionne correctement, il n'y a pas des raisons pour qu'elle soit utilisée de manière incorrecte ou inappropriée par les usagers. Pourtant, la sociologie des sciences et techniques a bien démontré que les objets techniques et la science sont des objets sociaux comme les autres : ils existent dans un espace à la rencontre des comportements, des valeurs et des représentations sociales et de la technique. C'est alors que peuvent apparaître des décalages entre l'usage prévu par le décideur/le fabricant et celui qui en est fait par l'utilisateur final. Les deux peuvent entrer en interactions harmonieuses mais peuvent aussi entrer en

2. Par exemple, voir les travaux du colloque de Sociologie de l'énergie : http://www.socio-energie2015.fr/wp-content/uploads/2015/06/JISE2015_programme_web1.pdf

conflit et devenir un obstacle potentiel à leur appropriation et donc, à leur efficacité prévue.

L'analyse sociologique vise à appréhender les modalités de réception, d'appropriation ou de rejet d'un stockage de chaleur sur un site industriel. Mais attention : ce processus n'est ni linéaire ni libre d'obstacles. Il peut être interrompu dans n'importe quelle phase et selon des modalités que nous pouvons à la fois comprendre et généraliser, avec la méthode proposée ici. Si l'on peut comprendre les modalités d'appropriation d'une innovation grâce aux bons outils d'analyses, il en est de même des blocages et des freins à ce processus. Tournons-nous maintenant vers notre analyse de la littérature.

2. De l'acceptabilité à l'appropriation : recension de littérature stockage bois-énergie

Deux domaines ont été consultés pour mener notre recension de la littérature sur la question du stockage de l'énergie :

- le stockage d'énergie
- l'acceptabilité des dispositifs techniques

Pour ces deux domaines, nous nous sommes appuyés sur des textes scientifiques issus de la géographie et l'urbanisme, de la sociologie de l'innovation et des sciences et techniques, des sciences de l'ingénieur et, à moindre égard, de l'économie. Nous avons aussi utilisé la littérature grise, c'est-à-dire des rapports ou documents de travail publiés par des organismes publics comme l'ADEME ou des villes.

Les études sur le stockage relèvent essentiellement de deux catégories : d'abord techniques (sur la mise en œuvre de procédés, techniques et d'innovations énergétiques bas carbone), ensuite technico-économique, ces dernières se focalisant sur la capacité d'un signal prix et des retours sur investissement à engendrer un intérêt pour le stockage³. La vaste majorité de ces

3. Beaucoup d'études concluent que les clients participant aux expérimentations sur l'énergie le font principalement pour économiser de l'argent mais cette conclusion est en partie biaisée par les méthodes laissant insuffisamment de places aux facteurs non-économiques. Ensuite, la réponse aux prix varie selon les caractéristiques des clients, ainsi que l'ampleur de la réduction de pointe. La notion de

textes n'aborde pas directement la question de l'acceptabilité et de l'appropriation du stockage et ceux qui s'attaquent à ces questions tendent à *décrire* quelques-unes des interactions entre technologie-innovation (par exemple, offre tarifaire, interface informatique-humain, effacements, efficacité, etc.) sans *expliquer les modalités de ces interactions*. On sait ce qui se passe mais on ne sait pas pourquoi certaines interactions existent et pas d'autres. Pourquoi l'acceptation et pourquoi le refus, par exemple ? La plupart des analyses recensées ne sont donc pas assez fines pour révéler toute la complexité et la richesse des interfaces humains-énergie – les IHE (notre terme). Certaines études ou encore des recensions d'études vont alors soulever des questions quant aux explications plausibles, souvent en conclusion, mais n'offrent pas de réponses. Quels sont alors les apports des sciences humaines et sociales (SHS) en ce qui concerne le stockage ?

2.1 Sociologie de l'énergie et stockage

Le nombre d'études sociologiques sur l'énergie en général et sur les nouvelles technologies de l'énergie – notamment les *smart grids* –, a augmenté depuis quelques années. À la fois les commanditaires et les acteurs publics et privés se rendent compte de l'importance des apports de la sociologie en la matière et, à leur tour, les sociologues s'intéressent davantage à ces dispositifs. Mais ce n'est pas le cas des études sur le stockage de l'énergie. La sociologie apporte alors des éclairages sur deux enjeux essentiels :

- **les représentations sociales et leurs interactions avec les dispositifs énergétiques et les pratiques**. En effet, les facteurs socioéconomiques classiques tels qu'utilisés dans beaucoup des textes recensés décrivent bien ces facteurs et leurs relations à la consommation énergétique mais ils expliquent mal pourquoi les ménages s'engagent ou non dans la MDE et ce qu'ils en font ensuite ;

« profils énergétiques » semble mieux expliquer ces comportements : S. La Branche, « Brève introduction à la sociologie de l'énergie », *Encyclopédie de l'énergie* <http://encyclopedie-energie.org/notices/br%C3%A8ve-introduction-%C3%A0-la-sociologie-de-l%E2%80%99%C3%A9nergie-0>. 2014.

- ***L'impact de la structure décisionnelle et organisationnelle*** de l'institution d'accueil de l'innovation énergétique sur son acceptabilité et son appropriation.

Malheureusement, dans ces études, nous observons que le milieu professionnel ne fait pas l'objet d'études sur l'acceptabilité et l'insertion d'une technologie innovante de MDE. C'est l'exploration de cet aspect qui a conduit cette étude. Nous avons donc posé l'hypothèse que les facteurs et les modalités d'insertion et d'appropriation (ou partielles ou refus) d'un stockage de chaleur dans le milieu professionnel dépendent :

1 - de sa complexité technique et/ou de gestion quotidienne,

2 - des parcours énergétiques et techniques préexistants des individus et de l'organisation dans laquelle le dispositif étudié s'insérera.

L'intérêt des SHS pour l'énergie est récent mais croît à grande vitesse, largement porté par le contexte énergétique, politique et social actuel, et la littérature se développe très rapidement sur cette thématique, dans les revues scientifiques francophones comme anglophones. Néanmoins, comme souligné ci-dessus, au sein de cette littérature émergente, le stockage demeure une notion très périphérique et très peu de cas d'études portant spécifiquement sur le stockage sont analysés : le stockage apparaît en général comme un élément technique dans une étude plus large, par exemple celle de la conception d'un éco quartier ou d'un autre dispositif. Le stockage est fondu dans le système analysé mais pas analysé en soi.

Nous pensons que ceci est dû à plusieurs raisons : i) la diffusion limitée du stockage n'en fait pas un objet sociologique ni un enjeu social ; ii) la sociologie de l'énergie est très récente et s'est davantage penchée sur les attitudes et les représentations liées à la sobriété ou encore aux *smart grids* mais pas au stockage car ; iii) cette question est très récente – on en est encore en phase expérimentale ou en pré-industrialisation - et enfin ; iv) il est possible que des études sur des sites privés existent mais celles-ci ne soient pas accessibles, les résultats étant confidentiels. Les textes traitant de l'acceptabilité des employés d'un site ou

d'un groupe directement concerné sont quasi inexistantes. La présente étude offre donc une réelle avancée dans ce domaine, avançant des éléments d'explication organisationnels sur l'intégration de l'innovation socio-énergétique dans un milieu professionnel. Si la sociologie se penche sur ce sujet dans le privé des ménages, elle a beaucoup moins traitée de cette question dans une organisation privée.

2.2 Bref retour d'expérience sur des chaufferies biomasse

Étant donné que l'expérimentation portait sur l'insertion d'un stockage dans une chaufferie bois, nous avons investigué les enjeux de stockage spécifiques au bois-énergie. Au cours des entretiens, nous avons donc cherché à vérifier si celui-ci est susceptible de modifier le fonctionnement de la chaufferie biomasse. Pour cette partie, nous nous appuyons sur une thèse de géographie soutenue fin 2014 à l'université de Grenoble sur les enjeux politiques, économiques et sociaux de l'essor du bois-énergie (Tabourdeau 2014)⁴.

Une précédente recherche⁵ nous a permis d'observer que l'un des principaux problèmes était l'élaboration d'un modèle d'affaire efficace. En effet, les circuits économiques de la biomasse diffèrent complètement de ceux du gaz et sont de plus, en plein renouvellement du fait de la demande accrue en bois-énergie. De ce fait, jusque vers 2010, les énergéticiens répondaient à toute demande de délégation de service public quelle que soit la puissance de la chaufferie. Après cette date, toute puissance inférieure à 10 MW a généralement été rejetée, obligeant les collectivités soit à changer d'énergie, soit à passer en régie (donc à développer une compétence interne) lorsqu'elles en avaient les moyens, soit à viser de plus importants réseaux de chaleur.

4. Tabourdeau, Antoine. 2014. « Entre forêt et énergie : composer la transition : le cas du bois-énergie en Auvergne et Rhône-Alpes ». Grenoble. <http://www.theses.fr/2014GRENH005>.

5. Debizet, Gilles, Stéphane La Branche, et Antoine Tabourdeau. 2016. « Transition énergétique dans les espaces urbanisés. Composer avec – ou recomposer – les régimes de l'énergie ». In *Scénarios de transition énergétique en ville. Acteurs, régulations, technologies*, Documentation française. Gilles Debizet.

Le dispositif de stockage étudié arrive donc *a priori* donc dans un créneau où les exploitants et les usagers sont réceptifs à toute occasion d'accroître le rendement et où des technologies de maîtrise de l'énergie sont les bienvenues et où, surtout, les normes qui étaient auparavant trop fermement établies sont susceptibles d'évoluer. Les opérateurs énergétiques sont en train de réajuster les façons d'opérer les installations de production ; ainsi ce que l'on appelle le « régime sociotechnique » (Berkhout, Smith, et Stirling 2004)⁶ (c'est-à-dire l'ensemble des habitudes de travail, des normes et règles) de la chaleur traditionnel est en train d'être renouvelé et se prête à des expérimentations visant à améliorer l'efficacité du système.

Le dispositif de stockage étudié pourra donc viser deux catégories de chaufferies : i) d'un côté, des chaufferies de petite taille en milieu rural et, de l'autre, ii), de grands réseaux de chaleur collectifs en milieu urbain. Les circuits d'approvisionnement en bois sont polarisés par les plus importantes chaufferies comme décrit ci-dessus. Cela permet de réaliser des économies d'échelle et, en standardisant les chaînes d'approvisionnement, de limiter les fluctuations potentielles dans la qualité de bois. Le calcul de l'optimisation de la chaufferie dépend donc de ces paramètres. Plusieurs avantages techniques sont potentiellement attendus d'un stockage comme le dispositif étudié (et donc de la réduction de l'utilisation de gaz d'appoint) comme le renforcement de la tendance à augmenter la taille des chaufferies bois. On peut donc aussi supposer que le stockage aurait des rétroactions potentiellement fortes, dépendant de sa taille, sur le fonctionnement de la chaufferie, non seulement technique mais aussi en termes de dimensionnement de l'ensemble des dispositifs environnants.

À ceci peut s'ajouter aussi un important impact supplémentaire : la planification d'un nouveau réseau de chaleur ou d'une extension jointe s'intègre désormais à la planification

6. Berkhout Frans, Smith Adrian & Stirling Andy, 2004, « Socio-technological regimes and transition contexts », *System Innovation and the Transition to Sustainability: Theory, Evidence and Policy*, p. 4875. Adresse : <http://www.sussex.ac.uk/Units/spru/publications/imprint/sewps/sewp106/sewp106.pdf>.

urbaine. La rénovation d'un quartier ou la création d'un éco quartier offrent souvent des occasions d'implanter de nouveaux dispositifs techniques. Dans le même temps, ces dispositifs et leur conception et réalisations sont confrontés aux contraintes urbanistiques du projet, obligeant énergéticiens et constructeurs à partager, mélanger, échanger leurs expériences et savoir-faire – en d'autres termes venir en confrontation les uns aux autres. De ce fait, l'implantation de dispositifs techniques ne s'envisage désormais plus seulement à l'échelle du bâtiment mais à l'échelle du quartier, voire de la collectivité. Ce qui favoriserait la demande pour le stockage de chaleur. Il nous semble très probable qu'un stockage de chaleur constitue un avantage important auprès des décideurs et investisseurs par ses capacités d'adaptation et d'intégration dans plusieurs types et tailles de réseaux.

Le contexte global énergétique et climatique est donc favorable à la diffusion et à l'implantation du stockage mais encore faut-il poser la question de sa réception dans son contexte organisationnel et ici, professionnel. En matière d'analyse des organisations et leur propension à intégrer ou non des innovations énergétiques et climatiques, il faut comprendre deux grandes notions : la dépendance au sentier et l'adéquation institutionnelle.

2.3 Éléments d'explications des facteurs organisationnels

La notion de dépendance au sentier de Pierson⁷ part du constat que tout processus décisionnel est affecté par les choix pris au départ et que certains de ces choix sont déterminants à long terme, provoquant un processus cumulatif de renforcement : plus on avance, plus il est difficile de changer de voie, et moins il y a d'alternatives structurelles, politiques, économiques, sociales et conceptuelles – on a de la difficulté à imaginer autre chose, une alternative. Le sentier s'approfondit et devient de plus en plus difficile à dévier. Ainsi, par exemple, chaque décision prise dans le cadre d'une société carbonée

7. P. Pierson (juin 2000). « Increasing Returns, Path Dependency, and the Study of Politics », *The American Political Science Review*, Vol. 94.

limite les possibilités de développer une société post carbone, ce qui rend plus l'insertion d'innovations qui n'entre pas dans ce cadre pré-existant. Cette notion est également développée sous le terme d'*imprinting*, traduisible par attachement ou empreinte (du temps).

Tenter de déceler les freins à l'appropriation d'une innovation (technique ou sociale), c'est donc devoir saisir les inerties dans leurs interactions, leur profondeur et leur complexité : freins politiques, économiques, techniques mais aussi organisationnels, comportementaux et mentaux. Nous en montrons quelques éléments dans notre analyse. La nécessité de développer le stockage inhérente à la transition énergétique peut donc faire face à ces différents obstacles. Dans le cas qui nous concerne, il s'agit de penser un site industriel qui représente un nœud socio énergétique (NSE) dans lequel s'insérera l'innovation du stockage de chaleur. Le NSE est un « groupe d'éléments physiques qui collectent, convertissent et/ou fournissent de l'énergie et qui sont construits par le même décideur »⁸. Ce décideur peut être un fournisseur d'énergie, un promoteur immobilier, un investisseur, une collectivité, etc. L'assemblage des NSE compose le système énergétique urbain autour desquels entrent en interaction plusieurs types d'acteurs énergétiques – producteurs, distributeurs, gestionnaires...

On le voit, concevoir le stockage comme un objet sociotechnique induit la nécessité de comprendre les freins et les obstacles socio-techniques, et donc une approche qui prend en compte les volets sociaux et organisationnels. Car le stockage s'insère non seulement dans un système technique composé de tuyaux, valves etc., mais aussi dans un système économique et sociétal global et interne, organisationnel. Les nouvelles pratiques potentiellement induites par l'innovation viennent donc se greffer sur l'existant (structurel et institutionnel) mais cette greffe ne prend pas sans problème. C'est ce que Young qualifie d'« adéquation institutionnelle »⁹ : une institution peut voir ses efforts

environnementaux (ou énergétiques) ralentis par le problème d'adéquation entre ses objectifs et sa structure interne (*institutional fit*). C'est un point essentiel : les efforts d'innovations énergétiques peuvent être niés par *la structure et le fonctionnement interne même des institutions impliquées*, en raison des lourdeurs, habitudes et cultures institutionnelles. Young met en avant que l'inertie (*“stickiness”*) naturelle des institutions peut nécessiter un changement de fonctionnement, voire *d'identité* (liée à la culture d'entreprise ou à sa hiérarchie, par exemple) pour qu'elles puissent atteindre ses objectifs. La logique interne de l'organisation aura des effets sur les modalités et l'ampleur de l'appropriation et de l'acceptation de l'innovation qu'est le stockage. Ceci pose plusieurs questions d'intérêt pour cette étude :

- Comment faire concorder la structure institutionnelle aux objectifs si des contradictions internes ou le refus de la part des employés ou de la hiérarchie apparaissent ?
- À quels types de logiques liées à i) sa culture et sa hiérarchie et ii) à ses employés, la firme fait-elle face ?
- Comment appréhender l'intégration de l'innovation dans le fonctionnement industriel du site ?
- Quels conflits internes peuvent-ils bloquer un projet de MDE ? comment les différents niveaux de compréhensions et d'intérêts ainsi que les représentations sociales de l'énergie impactent-ils les efforts de MDE au sein d'une organisation ?

Pour fournir des éléments de réponses à ces enjeux, nous avons procédé par le biais de la recension et par entretiens semi directifs avec les parties prenantes. Mais présentons rapidement notre cas d'analyse.

2.4 L'in/acceptabilité : un problème en apparence insoluble ?

Les SHS sont mal à l'aise avec le fait de traiter de questions « d'acceptabilité ». Ce malaise est dû au fait que souvent, elles sont interpellées par les décideurs et les sciences dites dures ou technologiques en fin de parcours du design

8. Debizet, Gilles, et Odile Blanchard. 2015. « Énergie en (éco)quartier ». *Innovatio*, n° 2 (février). <http://innovacs-innovatio.upmf-grenoble.fr/index.php?id=207>.

9. Young O.R. "Why Is There No Unified Theory of Environmental Governance?", PDF document: dlc.

dlib.indiana.edu/archive/00000943/00/young020402.pdf.p.23-24. 2002b.

technologique d'un dispositif, afin d'étudier les moyens d'aplanir les conflits et de « faire accepter » ledit dispositif par une population, alors qu'il est acquis depuis les années 1980 en sociologie que l'acceptabilité des dispositifs est indissociable des relations sociales et des représentations¹⁰. Autrement dit, on ne peut pas comprendre les relations conflictuelles soulevées sans réfléchir à l'ensemble des valeurs qui président à la conception. De ce fait, traiter une population comme une cible ignorante qu'il faudrait « convaincre par la force de la science et de la technologie » à changer est en contradiction avec l'apport même des SHS sur la question. Un numéro récent de la revue des sciences de l'environnement *VertigO* a mis en valeur cet « embarras »¹¹.

Se demander si la mise en service d'une technologie est « acceptable » véhicule donc l'idée que cette technologie est conçue par des acteurs « éclairés », conception à laquelle doit adhérer l'utilisateur, sans qu'il n'y ait de déviation possible dans l'utilisation. Ce fonctionnement a été mis en lumière par la sociologue Akrich¹², sous le terme « d'inscription » de la technologie, c'est-à-dire d'une écriture, d'un « script », de la technologie. Le concepteur d'une technologie fait des suppositions quant au comportement des usagers et adapte la réalisation et l'utilisation de sa technologie en fonction. C'est un cas typique des procédures de conception des bâtiments à haute efficacité énergétique, notons-le. De leur côté, les usagers réalisent un travail de « de-scription » qui matérialise l'usage de la

technologie dans la pratique. Cette matérialisation peut dans les faits aller du rejet à un usage passif et minimal à un usage en profondeur mais pas nécessairement pour les mêmes objectifs ou raisons que ce pour quoi l'innovation a été introduite. Cette approche de la technologie est très répandue dans la littérature scientifique.

Se concentrer sur l'innovation d'un point de vue uniquement technique et sectoriel conduit à considérer que seuls les outils technico-économiques peuvent fixer les bons objectifs et que les problèmes sont déconnectés de toute valeur politique, sociale, etc. (« value-free ») ; c'est-à-dire qu'ils n'ont pas besoin d'être discutés par le grand public, les décideurs (politiques) et les scientifiques. C'est comme si l'innovation technique ou énergétique était désolidarisée du tissu sociopolitique dans laquelle elle a été développée. Or, si cela était vrai, il n'existerait pas de problème d'acceptation (pour faire simple). Leur existence veut bien dire que ces outils font des choix sociaux. Cette erreur de pensée contribue donc à considérer les acteurs comme un « problème majeur », voire un obstacle en soi, et provoque une « division artificielle entre une vue "sociale" et une vue "technique" »¹³ et conduit à faire une fixation sur des solutions technologiques, alors même que ce sont elles le problème. De nouvelles approches ont été progressivement élaborées qui utilisent une approche plus « pragmatique », c'est-à-dire étudiant l'élaboration des valeurs par les différentes catégories d'acteurs : approche socio-technique (par des sociologues, mais aussi des géographes, politologues, etc.), l'étude des innovations et des transitions (par des économistes mais également des géographes, sociologues, etc.), etc. Ces travaux ont analysé très précisément les processus d'élaboration des technologies, au-delà de la grille « acceptabilité-faisabilité » qui est considérée comme passive car elle ne suppose qu'une acceptation des technologies par leurs usagers, sans prendre en compte la façon dont ces derniers se les approprient, refusent certains usages non adaptés à

10. Pinch, Trevor J., et Wiebe E. Bijker. 1984. « The Social Construction of Facts and Artefacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other ». *Social Studies of Science* 14 (3): 399-441. <http://www.jstor.org/stable/285355>.

11. Fournis, Yann, et Marie-José Fortin. 2015. « Une définition territoriale de l'acceptabilité sociale : pièges et défis conceptuels ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Volume 15 Numéro 3 (décembre). doi:10.4000/vertigo.16682 ; et Barbier, Rémi, et Alain Nadaï. 2015. « Acceptabilité sociale : partager l'embarras ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 15 N° 3 (décembre). doi:10.4000/vertigo.16686.

12. Akrich, Madeleine. 1992. « The De-scription of Technical Objects ». *Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change*, 20524. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00081744>.

13. Rutherford, Jonathan, et Olivier Coutard. 2014. « Urban Energy Transitions: Places, Processes and Politics of Socio-Technical Change ». *Urban Studies* 51 (7): 1353-77. doi:10.1177/0042098013500090.

leurs besoins ou au contraire imaginent de nouveaux usages au-delà de ce que leurs concepteurs ont pu envisager.

Plusieurs courants spécifiques à l'énergie ont émergé. Ce qui les réunit est le fait de concevoir la connexion entre l'ensemble des dispositifs et des acteurs. Ces approches relationnelles et interactionnelles, qui étudient les relations entre objets et acteurs, ont analysé en finesse l'appropriation des technologies par les acteurs, des concepteurs de technologies aux usagers en passant par les exploitants et les aménageurs.

3. Méthode

3.1 Choix du cas d'étude

Depuis la deuxième moitié des années 2000, l'essor des chaufferies biomasse collectives a été encouragé par des subventions avec notamment le Fonds Chaleur instauré en 2009 et piloté par l'ADEME, dans un contexte d'efforts à diminuer les gaz à effets de serre et à dynamiser l'économie territoriale.

Le choix du cas d'étude s'est fait sur demande du commanditaire et a été confirmé après discussion avec lui. Il s'agit d'un réseau de chaleur urbain dans une agglomération urbaine de taille moyenne. Ce réseau de chaleur est alimenté par une chaufferie biomasse entrée en service en février 2015, sur un site d'environ un hectare dans une zone d'activité près d'un quartier que la chaufferie dessert en chaleur (chauffage et ECS, le dernier étant la source principale des pointes du matin). La chaufferie biomasse remplace une ancienne chaufferie en gaz, située sur un site assez proche. La chaufferie est exploitée par une entreprise spécialisée dans les services à l'énergie et l'environnement, notamment l'optimisation des modèles énergétiques. Quatre employés travaillent sur le site.

L'approvisionnement en bois est géré selon une routine bien standardisée et a priori peu sujet à variations en ce qui concerne le dispositif de stockage : pesée des camions livrant les plaquettes à l'entrée et à la sortie, prélèvements d'échantillons, contrôle visuel, déchargement. L'exploitant a contractualisé avec un groupement de producteurs de plaquettes pour assurer l'approvisionnement en plaquettes

forestières de la chaufferie. Les *échantillons* de bois sont prélevés afin de mesurer la conformité de la qualité du bois livré à celle promise dans le contrat d'approvisionnement. La moitié des échantillons sont conservés jusqu'au paiement en fin de mois puis détruits.

Une nouveauté (relative) contractuelle par rapport aux contrats d'approvisionnement habituels en bois-énergie est que l'exploitant n'achète pas des tonnes de bois mais des MWh. Ceci relève d'une tendance générale de transformation des contrats d'approvisionnement de chaufferie biomasse qui n'est pas spécifique à l'exploitant de notre cas d'étude et que nous avons déjà observé au cours d'autres travaux. Le combustible est formé de plaquettes à la fois forestières et industrielles (rebus de palettes), avec une obligation contractuelle de s'approvisionner dans un rayon de 80 km – dans la convention ADEME pour obtenir les subventions. La chaufferie a une capacité de stockage de 4 jours, ceci afin de faire face à une coupure des approvisionnements (en cas de chute de neige juste après des jours fériés, par exemple).

Le réseau de chaleur mesurait 8,5 kilomètres et alimentait environ 5 000 équivalents logements au moment des entretiens (janvier-février 2016) ; une extension dans les années à venir est probable. La chaufferie, quant à elle, se compose de deux chaudières biomasse de 5 et 7 MW de puissance, consommant environ 20 000 tonnes de bois par an, ce qui demande le passage de 700 camions de bois annuellement, soit 5 à 6 semi-remorques par jour. Elles sont complétées par des chaudières gaz qui fonctionnent dans deux cas de figure :

- en remplacement, en cas d'arrêt des chaufferies biomasse (panne ou pour maintenance),
- en appoint, lorsque des périodes de froid provoquent une demande trop importante pour que les chaudières biomasse puissent y répondre seules.

Aujourd'hui dès que la température descend vers 0°C, il faut recourir au gaz pour combler les pics de consommation du matin (le plus fort) et éventuellement, du soir. Cependant, un facteur réglementaire intervient ici : le gaz ne peut pas couvrir plus de 15 % de la consommation selon le contrat de subvention de la chaufferie biomasse passé avec l'ADEME.

Néanmoins, la puissance des chaufferies gaz est bien supérieure car elle doit pouvoir couvrir tout le réseau à elle seule en cas de panne.

3.2 Méthode d'enquête

Les entretiens visaient à étudier l'impact du dispositif de stockage sur le fonctionnement du système énergétique et à mettre en lumière les avantages et les dysfonctionnements (professionnels, énergétiques, business models, etc.) que pourrait provoquer l'installation du dispositif testé. Nos interlocuteurs étaient donc principalement des gestionnaires et des techniciens, usagers de la technologie mais pas consommateurs de la chaleur. Nous les avons interrogés sur les interactions entre eux et le dispositif :

- Quel était leurs niveaux de compréhension du stockage en général ?
- que comprennent-ils du projet, ses objectifs, avantages et inconvénients ?
- quels les impacts sur le fonctionnement de la chaufferie, sa gestion, le business model, sa maintenance et leur travail au quotidien ?

La durée de la mission ne permettait pas un grand nombre d'entretiens (environ 5 prévus). Il a donc fallu cibler les acteurs-clés directement en contact avec le prototype de stockage. Au total, quatre entretiens ont donc été réalisés au cours de trois rencontres : un premier auprès du directeur régional d'agence, un deuxième auprès du responsable d'exploitation technique et de ses techniciens sur le site et un troisième auprès du directeur technique. La mission donnée à ces entretiens était la suivante : « comprendre les modalités sociales et organisationnelles de l'insertion d'un dispositif innovant de stockage thermique dans le milieu professionnel. Les techniciens du site ont donc été désignés en priorité, ainsi que les responsables techniques et de l'agence régionale d'exploitation. Il est apparu aussi que dans la phase post-expérimentation, il sera nécessaire d'interroger les acteurs de la Ville.

L'objectif était de saisir l'organisation des étapes de la démonstration pour les acteurs impliqués, depuis la « preuve de concept » jusqu'au « démonstrateur » sur site. Comment ces acteurs vont-ils s'organiser ? Quels changements de pratiques, attentes, optimisations et freins inattendus pourraient surgir ? Quelles

sont leurs attentes et leurs craintes ? Nous chercherons à comprendre les ramifications de cette innovation et de son insertion dans la chaîne d'acteurs.

4. Résultats des entretiens

Dans cette partie, nous présentons la méthode et les principaux résultats des entretiens semi-directifs, en complément de la revue de littérature de la première partie.

4.1 Motivations et avantages perçus

4.1.1 Lisser la consommation

Le stockage a été conçu principalement par le commanditaire comme un moyen de lisser les deux principaux pics de consommation journaliers observés par l'exploitant. Ils correspondent à une demande domestique, principalement d'eau chaude sanitaire (ECS), « *c'est plus l'ECS que le chauffage qui demande, parce qu'on part de rien, 2°C, et on monte. Le chauffage lui, c'est que quelques degrés en plus. Juste pour cette période, le stockage serait utile car c'est là surtout et pour cette raison que le gaz est relancé* ». Plus le retour est froid, plus un appoint est jugé utile par les interviewés, qui ne divergent pas de ce qui a été conçu par le commanditaire sur ce point. Le plus important de ces pics de consommation intervient entre 6h du matin et 8h30. Il existe un autre pic le soir mais celui-ci est plus long et moins élevé que celui du matin.

Il existe une spécificité locale, le décalage des horaires des pics par rapport à la moyenne nationale, plutôt vers 7 heures du matin, alors que celle du réseau étudiée démarre plus tôt du fait de la présence de frontaliers qui se lèvent un peu plus tôt, à 6 heures du matin, à cause de conditions de circulation particulièrement difficiles pour aller travailler. Il s'agit donc d'une spécificité territoriale, comme chaque site en présente et dont il faudra tenir systématiquement compte dans un potentiel déploiement. En effet, cela peut avoir comme conséquence potentielle un appel plus long sur le système, des exigences différentes de la part des usagers et une incompréhension en cas de saturation du réseau (si le stockage n'a pas le temps de

se remplir correctement et de jouer son rôle un peu plus tôt qu'ailleurs en France).

Si le dispositif testé était la première expérimentation de stockage pour nos interrogés, la possibilité de lisser les pics de consommation et de réduire la dépendance au gaz a été tout de suite exprimée par tous nos interlocuteurs et ce, sans que ce soit mentionné par les enquêteurs : « *Si on arrive à trouver un système pour lisser la production, les chaudières bois n'en seront que mieux. Si elles arrivent à produire 24 heures d'affilée à une puissance constante et que c'est plutôt le stockage qui fait l'absorption, c'est bien* ».

4.1.2 « Lisser » les contraintes réglementaires

L'autre avantage qui a émergé très rapidement de l'utilisation du stockage est la plus grande marge de manœuvre qu'il offre par rapport à deux contraintes réglementaires.

La première contrainte est liée au mix énergétique de la chaufferie. L'exploitant est en effet tenu de respecter le seuil de 15 % de chaleur issue du gaz afin de ne pas perdre la subvention de l'ADEME. Disposer d'un dispositif de stockage constitue donc une assurance supplémentaire de ce point de vue : en cas de panne sur la chaufferie bois ou bien de période de grand froid, utiliser la chaleur issue du stockage (donc de la biomasse) limiterait le recours au gaz. L'équipe technique a donc très rapidement perçu les bénéfices du stockage, tout d'abord pour l'équilibre énergétique, entre la part de gaz dans le mix (et les gaz à effet de serre en découlant) et les énergies renouvelables.

La seconde contrainte qui pourrait être assouplie sinon contournée grâce au stockage concerne la lourdeur juridique de l'installation d'une chaufferie de forte puissance. : si on dépasse le seuil de 20 MW de puissance, cela change le régime d'installation (de simple déclaration à installation soumise à autorisation au titre de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, ce qui implique une enquête publique d'un an et demi environ). Le stockage permettrait donc au délégataire de baisser la puissance de la chaufferie pour revenir à une catégorie de puissance soumise à une réglementation moins contraignante.

4.2 La question complexe du flux tendu de production de chaleur

Une bonne partie de la discussion a tourné autour de la question du flux de production. La chaufferie n'a pas besoin d'appoint en été pour l'ECS mais en hiver, dès que la température extérieure atteint 1°C, l'équipe est obligée de faire appel au gaz pour surmonter les pics de consommation du matin et du soir. En cela, le stockage de chaleur serait très bénéfique. Mais la chaufferie, à cette température, fonctionne à flux tendu : « *Si on a 0°C sans arrêt 24/24, on ne pourra pas chauffer le stockage, on n'a rien pour lui* ». Ceci est lié à un second aspect : si le nombre de clients à chauffer augmente, cela pourrait avoir un effet négatif sur la capacité à alimenter le stockage. Et c'est le cas, avec le raccordement prévu d'une nouvelle copropriété et d'un poste de police, ce qui rend le recours au gaz encore plus nécessaire. D'où un double positionnement : le stockage diminue le recours au gaz certes mais augmente aussi la demande de la chaudière bois qui tourne déjà à plein régime. Que restera-t-il alors pour le stockage, et ensuite, quel équilibre sur la saison de chauffe complète ?

Ceci dépend de la température moyenne. À moyen et à long terme, il faut comprendre que le changement climatique, avec une augmentation des moyennes de température, ne signifie pas qu'il n'y aura pas de périodes froides, même courtes. La chaudière au bois pourrait donc de ne pas suffire durant ces périodes. Faire le calcul coûts-bénéfices (dans le sens large du terme, économique, politique, environnemental et énergétique) nécessite de mieux anticiper la météo de quelques jours, mais aussi à long terme, en tenant compte des subventions et pénalités possibles. Le stockage est en effet d'autant plus intéressant qu'il existe une pénalisation au point de vue des subventions si l'apport du gaz dépasse 15 %, et ce, **même avec une augmentation du nombre des clients**. Enfin, sur cette question, le client ne peut pas payer plus que 15 % de sa facture au tarif gaz. Si cette limite est dépassée, la différence est au frais de l'exploitant. Le stockage peut donc réduire ces risques, selon les interrogés, notamment si plusieurs sont

installés – ce qui ne résout pas le problème de la capacité de la chaufferie à recharger les stockages. Ceci enfin, est lié au temps de recharge durant les heures creuses : les plages existent bien (nuit et après-midi) mais il est nécessaire d'optimiser ces plages pour assurer l'efficacité du stockage, notamment lors de périodes de grand froid où il sera fortement mis à contribution et ne disposera que de peu de temps de recharge. Selon un des interrogés, cela ne poserait pas de problème mais des données techniques en situation réelle sont nécessaires.

4.3 Deux échelles d'analyse

Nos entretiens ont montré qu'il faut adopter deux échelles d'analyse de l'insertion du dispositif de stockage : interne au site, et externe, au niveau du réseau et de ses agrandissements possibles.

4.3.1 L'emplacement interne du stockage

La première analyse a concerné **l'emplacement du stockage** : où l'installer dans le système de chaufferie ? Il apparaît clairement à tous les enquêtés que le point de connexion doit obligatoirement se situer entre le système de production (chaudière biomasse) et le départ du réseau :

« C'est impératif, il faut qu'il soit LÀ. Parce que là ça va permettre de gérer votre boucle de stockage en local. Si on commence à gérer des boucles de stockage à 500 m ou 1 km, ça va devenir très compliqué. »

Selon tous nos interlocuteurs, le stockage serait mieux placé en fin de flot et au plus près de la production biomasse : après le retour pour préchauffer l'eau avant le chauffage. Ça réduit l'énergie pour chauffer l'eau. De plus, cela concorde avec l'emplacement physique capable d'accueillir le dispositif de stockage : *« Il faut chauffer le retour du réseau, la partie la plus froide, faire une dérivation sur le retour réseau pour chauffer le retour et diminuer la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer le réseau sortant »*. En effet, la température de sortie est entre 92°C-94°C en hiver, 80°C en été mais le retour est à 75°C environ, voire à 60°C en hiver (avec la chaleur perdue par la demande, le matin, suite à la baisse durant la nuit).

« Avec une température inférieure à 75°C, il faut préchauffer le système et injecter le gaz, sinon la chaleur de sortie n'est pas suffisante durant les périodes les plus froides ». Le stockage serait très bénéfique à ce stade. Positionner le stockage entre la chaufferie bois et la chaufferie gaz serait idéal car cela permettrait de faire une boucle très courte, entre la production et le stockage. L'idéal serait de l'enterrer mais rien n'empêche de le faire en aérien : les économies faites en génie civil seront reportées sur l'isolation.

À moyen terme, c'est-à-dire d'ici 10 à 15 ans, il serait possible d'envisager un positionnement **radicalement différent** du stockage, au niveau même des immeubles et gérés soit par les copropriétaires ou les bailleurs sociaux, soit par le gestionnaire de réseau : Enquêté : *« Mais il faudra que le stockage soit rentré dans l'esprit des gens. Et notamment des copropriétaires et des gros bailleurs sociaux. Pour qu'à terme ils envisagent de mettre un stockage sur leur propre installation. »*

Pour se faire, les initiatives politiques – conditions de constructions, urbanisme, etc. – seront importantes. Le stockage débutera par la chaufferie du fait de son aspect expérimental, qui nécessite de contrôler au début les dépenses en réalisant des économies d'échelle, mais aussi à cause du besoin de réduire les problèmes liés au foisonnement du réseau. Néanmoins, à terme, comme expliqué ci-dessus, cela pourrait être intéressant pour l'utilisateur comme pour l'exploitant de placer le stockage chez l'utilisateur. Pour les usagers, cela aurait pour avantage de réduire leur puissance souscrite.

4.3.2 Ancrage dans un réseau externe

Le réseau externe correspond aux décideurs conditionnant le déploiement du dispositif de stockage : décideurs politiques et aux appuis financiers (subventions, facilités d'accès aux sites, etc.). Ce réseau regroupe aussi bien les collectivités au niveau local que des services de l'État au niveau national, comme l'ADEME. L'ADEME joue un rôle financier et la collectivité concernée fait un suivi strict de la tarification de l'énergie (sous-traitée à un bureau de contrôle) avec une correction climatique

entre immeubles par mètre carré (un degré/jour par mètre carré). Du fait de cette vigilance, les retombées économiques ne profitent pas qu'à l'exploitant mais sont aussi redistribuées aux usagers et toute modification des installations qui engendre une amélioration des performances nécessite de réaliser un accord de la collectivité concernée. Cette dernière est ainsi très sensible aux questions climatiques avec de fortes incitations de la part d'un homme politique local, le maire-adjoint, en faveur de la réalisation d'économies d'utilisation. Globalement, la collectivité territoriale témoigne d'une sensibilité locale forte aux questions climatiques, énergétiques et environnementales et pourrait servir de vecteur pour communiquer et faire réfléchir au rôle du stockage. Dans une autre ville, souvent cité pendant les entretiens car l'exploitant y gère également un réseau de chaleur alimenté par une chaufferie biomasse, c'est aussi à la demande du maire que la gestion de deux réseaux de chaleur a été regroupée et qu'une centrale biomasse mise en place.

Ainsi, le second facteur externe potentiel : l'implication éventuelle de la collectivité locale dans l'installation future du stockage sur un site de chaufferie bois : *« La Ville délivre un service public de chauffage à des abonnés et la gestion de ce service public est déléguée à un privé. Mais ils sont chez eux. On ne fait rien sans autorisation de la Ville. On vend la chaleur à des abonnés, mais je ne facture pas tant que la Ville ne valide les prix... Mais la Ville devrait aisément voir l'avantage : sur le taux de couverture bois, si ça permet de le monter à 90 % au lieu de 85 %, même si le gaz s'est cassé la gueule en ce moment en prix ; quand on calcule notre mixité en prix, ça fait bien un gain sur le prix ».*

L'intérêt principal pour la Ville selon eux serait l'absorption des pointes et la diminution de la consommation de gaz. Enfin, l'implication des résidents concernés devra aussi être envisagée : *« [Ici], tous les ans, ils réunissent tous les abonnés dans une réunion où ils expliquent comment s'est déroulée l'année, les tarifications immeuble par immeuble avec un historique sur 15 ans. Ils ont demandé de faire visiter l'installation ».* Cet élément pourra avoir des

conséquences lors de la phase opérationnelle du projet, surtout qu'il y aura des incidences économiques qu'il faudra répercuter sur les abonnés. Une modification du business model est probable sur ce point.

5. Impacts sur le travail

5.1 Des modifications en apparence négligeables

A priori, il n'y aurait aucun impact sur le temps de travail des techniciens et ingénieurs en charge du fonctionnement. Potentiellement même, cela pourrait signifier moins de maintenance car un vieillissement ralenti des chaudières à gaz du fait de leur moindre utilisation. Le cycle de charge/décharge du stockage ne va pas amener de travail supplémentaire en termes de maintenance technique de la chaufferie et d'entretien du réseau. Un problème sur le stockage ne ferait perdre qu'une quantité négligeable d'investissement et de travail. Il nous semble que les interrogés ont tout de même oublié, ce qui a quelques incidences, la facture du bois mais aussi le nombre d'échantillons à gérer et enfin, le nombre de passage de camions, en particulier si l'une des chaufferies peut être arrêtée pendant l'été grâce au stockage : moins de gaz, plus de bois, plus de livraisons. Ce sont plutôt les concepteurs du dispositif qui ont mentionné des impacts.

L'un des gros avantages du dispositif de stockage est qu'il peut se moduler en ajoutant des dispositifs. En cas de problème technique sur le stockage, l'exploitant n'aurait aucun problème pour rebasculer sur un fonctionnement sans stockage. Et en cas de problème technique sur le reste de la chaufferie, le stockage permettrait de prendre le relais pour un court moment sans avoir à rebasculer sur le gaz.

5.2 Business model et stockage de chaleur

En l'état actuel, plusieurs incertitudes économiques pèsent sur le fonctionnement du système énergétique biomasse-gaz. L'installation d'une capacité de stockage importante conduirait à réviser ces contraintes pour l'exploitant sous réserve des facteurs mentionnés plus haut sur le flux tendu.

Le business model de la chaufferie se base sur un équilibre entre le prix du bois brûlé, le prix du gaz et les proportions de quantité consommée, le tout encadré par des obligations contractuelles de mix énergétique (un maximum de 15 % de gaz) associées à trois volets financiers différents : la vente de chaleur en soi, les subventions de l'Ademe et une garantie auprès des clients sur le gaz. « *On pourrait tourner plus au gaz sauf que ça nous pénalise dans les prix et puis il faut qu'on tienne aux 85 % de bois, c'est lié aux subventions ADEME* ». Un dépassement du gaz a donc un double effet négatif : une perte des subventions de l'Ademe et une augmentation des coûts qui n'est pas répercutée sur le client mais absorbée par l'exploitant. Pour les interviewés, il est clair que le stockage, en permettant un recours moins important au gaz, réduirait ce double risque financier (et, contractuel avec la Ville et, ensuite, conventionnel avec l'ADEME). Mais quid du business model d'une chaufferie qui ne pourrait pas chauffer le stockage lors des périodes où la chaudière fonctionne déjà à 100 % ?

La capacité de recharge de la chaufferie lors des périodes de froid doit être évaluée soigneusement, en prenant en compte les subventions, réglementations et aussi, par exemple, le coût de l'assurance prise avec le gestionnaire du réseau de gaz. En effet, les gestionnaires de réseaux gaz proposent à l'exploitant de souscrire à une capacité de stockage. Cette capacité de stockage équivaut à une forme d'assurance pour l'exploitant : en cas de problème de distribution, elle l'autorise à prélever sur les stocks tampons du gestionnaire s'il y a une dégradation ou une incapacité du réseau de gaz, ce qui l'assure de toujours pouvoir livrer ses clients. Cependant le coût de la capacité est très élevé (80 000 € HT nous ont été cités pour un autre réseau). Il s'agit donc d'une prise de risque économique importante pour l'exploitant : en cas de pépin, la fourniture aux usagers est impossible. Pour notre cas d'étude, l'exploitant a partiellement souscrit à la capacité en comptant sur le fait que la multiplication des ressources énergétiques leur permettrait de sécuriser leur installation.

5.3 Des évolutions à attendre : déploiement de nouvelles compétences sur la gestion des données

Les entretiens ont mis en valeur que la mise en place du stockage pourrait déclencher ou accompagner le déploiement de nouvelles compétences pour les gestionnaires et techniciens du réseau. Notamment, le stockage va renforcer le besoin d'anticiper le fonctionnement du réseau : de ce fait, les données de consommation et production vont occuper une place de plus en plus importante afin d'être à même de prévoir les périodes de décharge et de recharge du stockage. L'aspect « *big data* » va donc occuper une place croissante dans la gestion du réseau qui devra être conjugué avec les aspects classiques d'entretien technique.

Si les acteurs impliqués disposent d'une connaissance empirique déjà importante de la temporalité des pics de consommation et des moments de recharge possibles, un temps de travail encore important est toujours consacré par l'un des responsables à analyser le fonctionnement du réseau pour trouver la meilleure configuration possible : il ne faut pas forcément démarrer dès que les indicateurs montent, mais savoir par expérience que la pointe va pouvoir s'effacer, même si la température du réseau baisse un peu. Par exemple, pendant des hivers très froids un nouveau phénomène a été découvert : l'appel de puissance n'est pas pendant le pic de froid (-17°C), mais deux jours après à cause de l'inertie de bâtiments : « *Là, je me suis dit : «ça remet en cause beaucoup de tes certitudes». Et d'un autre côté ça m'a rassuré, parce que je me suis dit : «si on commence à travailler sur ce sujet-là, ça veut dire que pour les conditions climatiques aujourd'hui, on est presque capable de prédire ce qui va se passer dans 2 jours.* » Ceci est nécessaire pour engager une modélisation basée sur des données empiriques, afin de prévoir au mieux les temps de recharges.

Mais ces apprentissages se font en permanence sur le réseau et ne sont étrangers à l'organisation : l'équipe n'a pas été surprise par l'expérimentation, une attitude associée à la culture organisationnelle de l'exploitant plus largement et qui est confirmée par tous nos

entretiens. « Chez [l'exploitant] on essaie plein de trucs (...) dans l'esprit, c'est assez volontaire. Après on a un équilibre économique, entre les investissements, tout ça. Il y a des réalités qui nous rattrapent ! On travaille avec XXX par exemple sur un projet de méthanisation : on a monté une structure commune, je ne sais pas où ça ira. Donc oui, ça fait partie de la culture de la maison ».

Il est nécessaire d'approfondir cette connaissance pour engager une modélisation basée sur des données empiriques. Cette capacité d'anticipation est nécessaire pour prévoir au mieux les temps de recharges.

6. Conclusion

Pour conclure, l'un des principaux résultats de notre revue de littérature est la faiblesse des études en SHS sur le stockage de l'énergie et ses implications sur les systèmes socio-énergétiques et les acteurs concernés. Cela peut s'expliquer par le très faible déploiement du stockage, encore en phase expérimentale. Néanmoins, le potentiel du stockage est relevé à la fois par les efforts de transition énergétique, ainsi que par les travaux et projets récents. Le stockage constitue un enjeu clef pour la gestion des énergies renouvelables, au même titre que l'amélioration de la sobriété et de la gestion de l'efficacité auxquelles de nombreuses études ont été consacrées, comme le montrent les cas très médiatisés des compteurs intelligents et des *smart grids* en général.

D'un autre côté, les SHS investissent de plus en plus le champ de l'énergie et pas seulement en fin de chaîne de développement, mais dès le stade de l'élaboration et de la réalisation des prototypes. Les SHS proposent des approches innovantes en s'appuyant sur des approches développées depuis une trentaine d'années mais encore mal intégrées en R&D. Les SHS offrent une vision plus systémique de l'insertion des innovations technico-énergétiques qui permet de mieux comprendre les freins et les moteurs de l'insertion, de l'appropriation et de l'acceptabilité sociale et professionnelle des innovations associées à la transition climatique-énergétique. Au vu de ces éléments, le stockage

constitue un cas intéressant où il est possible de mobiliser ces travaux dans une démarche de co-construction entre SHS et sciences exactes.

Cet article a esquissé en quoi les dimensions techniques organisationnelles et politiques s'entremêlaient et influençaient réciproquement les unes sur les autres. Il apparaît déjà de manière évidente que l'insertion d'un stockage en milieu professionnel offre un intérêt technique et économique réel pour les interrogés. Nos entretiens ont aussi montré que l'installation d'un dispositif de stockage vue à travers l'insertion opérationnelle chez son exploitant est de nature à attirer un large éventail d'acteurs, de natures très différentes. De nombreuses améliorations sont attendues, en phase avec l'objectif initial imaginé par les concepteurs de la technologie, avec des impacts négatifs relativement légers.

Néanmoins, ce travail illustre que, comme toute modification de dispositifs techniques, des changements de fond sont également à attendre. Ces changements concernent l'émergence possible et probable de nouveaux modes de planification énergétique avec notamment une réduction des puissances installées au profit du stockage. Cette modification risque d'avoir une incidence sur le rôle de l'exploitant : si l'exploitation des réseaux va continuer à représenter son cœur de métier pour une longue période encore, il apparaît déjà que la gestion du stockage, malgré sa relative simplicité d'usage, va devenir un processus de plus en plus important. À ce titre, l'apprentissage des habitudes de consommation (et l'essor des *big data* en découlant) et les modèles d'affaires vont constituer deux éléments essentiels. Enfin, un déplacement spatial, avec des impacts sur la planification urbaine énergétique, pourrait survenir avec le retour des dispositifs de stockage décentralisés au niveau des habitations. ■

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement le CEA-Liten et Idex pour le soutien de cette étude ainsi que les retours critiques et constructifs apportés par MM. Sébastien Vésin et Léo Révil du CEA-Liten qui ont largement contribué à améliorer ce travail, ainsi que Jérôme Moret d'Idex pour son aide pour les entretiens. Nous remercions également l'ensemble des personnes ayant acceptées d'être interrogées au cours de l'enquête.