

Rafraîchir l'Inde sans réchauffer la planète.

Impacts de l'accélération de la climatisation
en Inde sur l'environnement.

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par Lara Pousset en vue de l'obtention du
grade académique de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement à
finalité Gestion de l'Environnement (M-ENVIG)

Année Académique : 2017-2018

Directeur : Prof. E. Zaccai

Résumé

L'intérêt d'un tel sujet alliant les évolutions d'une société et ses impacts directs sur l'environnement, c'est de laisser une grande ouverture aux perspectives et aux débats. La problématique de l'acquisition de plus en plus rapide et massive dans les pays en développement d'un équipement terriblement énergivore qu'est l'air conditionné pose d'emblée une question d'ordre sociale, cette acquisition est-elle réellement un besoin face à des hautes poussées de températures, dans quel cas tout le monde devrait pouvoir en être équipé, ou au contraire est-elle un signe de possession d'un bien dit de « luxe » à l'instar des classes sociale élevées dans nos modèles occidentaux ?

L'étude ci- présente démontrera qu'en Inde, les classes sociales bougent, les revenus augmentant, particulièrement dans les villes et permettant donc à de plus en plus de gens de s'équiper d'un système d'air conditionné pour rafraîchir leur logement ou accueillir dignement leurs invités. Actuellement ce sont seulement 2% des ménages indiens qui utilisent un tel équipement, ce taux étant projeté pour atteindre les 73% d'ici 2030 (Phadke, 2014).

Les températures ambiantes représentent finalement assez peu de motivations dans l'envie de s'acheter un climatiseur. Mais à l'échelle d'un pays aussi grand que l'Inde qui pourrait devenir le pays le plus peuplé du monde d'ici 2025 (Remme *et al*, 2011), comment ne pas avoir d'envie d'en calculer les impacts directs sur l'environnement ? Les appareils électroménagers, et les climatiseurs en particulier, utilisent actuellement des gaz frigorigènes extrêmement nocifs pour l'environnement, les hydrofluorocarbures (HFC), dont la croissance évolue entre 10% et 15% par an, et qui pourraient être tenus pour responsable d'une hausse des températures de 0,5°C d'ici la fin du siècle (Zaelke *et al*, 2017). Terriblement énergivores, ces systèmes d'air conditionné représente également une pression considérable sur le réseau électrique indien, déjà fortement fragilisé, entraînant des coupures de courant fréquentes, paralysantes pour le pays. L'énergie puissante que nécessite l'utilisation de l'air conditionné, surtout en période estivale, est imputable à hauteur de 60% ces épisodes de charge limite de pointe, à Delhi par exemple.

La communauté internationale, mais l'Inde également, ont bien conscience de tels impacts sur le réchauffement climatique et désirent encadrer cette évolution croissante dans les pays en développement, en essayant de limiter au maximum les émissions néfastes pour l'environnement et en recommandant certaines alternatives qu'elles soient technologiques, ou qu'elles concernent des substances chimiques comme l'ammoniac ou les hydrocarbures, possédant un Potentiel de Réchauffement Global beaucoup plus faible que les HFCs actuellement utilisés. Une des différentes alternatives semblerait être également la climatisation solaire, puisant son énergie dans une source inépuisable que représente le soleil, surtout dans des pays tropicaux ou subtropicaux exposés aux rayonnements solaires de nombreux jours sur l'année. C'est en s'appuyant sur ce postulat que l'Inde a mis en place « The National Solar Mission » visant à augmenter la part d'énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire dans son mix énergétique national d'ici 2022 (Waldron, 2017).

Une telle problématique implique donc non seulement une réflexion et des agissements sur la consommation d'énergie de ces équipements, mais aussi une compréhension plus large de cette tendance, en lien avec la perception du confort thermique dans ces pays en développement.

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de mémoire, le professeur Edwin Zaccai ; premièrement pour la proposition du sujet développé dans ce papier, auquel je n'aurais pas pensé de premiers abords mais qui, tout au long de mes recherches, s'est modifié et forgé en une problématique extrêmement intéressante et intrigante, ensuite pour ses suggestions, commentaires et corrections avisés et constructifs tout au long de la rédaction de ce mémoire.

De plus, le mémoire représentant l'accomplissement final de mon cursus universitaire, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien tout le long de mon parcours d'étudiante. Mes parents pour leurs conseils et leurs relectures nécessaires à la finalisation de ce travail ainsi que mes frères, pour leur motivation et leur soutien constants.

Enfin, je remercie particulièrement Antoine, pour ses conseils, sa patience et sa bienveillance ainsi que toute la team du Cercle des Etudiants en Environnement et Tourisme pour l'entraide et la motivation nécessaire à l'aboutissement de ce travail.

Table des illustrations

Table des figures

Figure 1 :	
Schéma de fonctionnement d'un climatiseur traditionnel. Source : ADEME, 2015	p.17
Figure 2 :	
Prévisions des stocks d'Air conditionné au niveau mondial. Source : Shah <i>et al</i> , 2015	p.19
Figure 3 :	
Pénétration des appareils clés dans les ménages urbains chinois entre 1981 et 2010. Source : Phadke <i>et al</i> , 2014.....	p.22
Figure 4 :	
Températures annuelles en Inde. Source : Maps of India, 2014	p. 25
Figure 5 & 6 :	
Consommation d'énergie finale et consommation d'énergie finale par habitant. Source : Chappoz & Laponche, 2013.....	p.25
Figure 7 & 8 :	
Consommation d'énergie finale par produit. Source : Chappoz & Laponche, 2013	p. 26
Figure 9 :	
Modèle de consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel indien. Source : Padigal <i>et al</i> , 2014.....	p.28
Figure 10 :	
Ventes des climatiseurs de type individuelle (splits et type « fenêtre ») en Inde. Source : Phadke <i>et al</i> , 2014.....	p.29
Figure 11 :	
Croissance de certains équipements en Chine et comparaison avec la situation indienne en 2011. Source : Shah <i>et al</i> , 2015.....	p.30
Figure 12 :	
Population urbaine et rurale du monde, 1950-2050. Source : United Nations, 2014	p.36
Figure 13 :	
Indices des prix de gros des principaux appareils électriques et moyenne de tous les produits (1994=100). Source : Phadke <i>et al</i> , 2014.....	p. 39

Figure 14 :	
Revenu, climat et climatisation. (A) Pour les municipalités avec des DJR inférieurs à la moyenne. (B) Pour des municipalités avec des DJR supérieurs à la moyenne. Source : Davis & Gertler, 2015.....	p.40
Figure 15 :	
Saturation des systèmes d'air conditionné et des refroidisseurs d'air dans les ménages urbains indien par tranche de revenus. Source : Phadke <i>et al</i> , 2014.....	p.41
Figure 16 :	
Saturation des climatiseurs dans les ménages urbains en 2004-05, dans certains états et dans toutes les tranches de revenus. Source : Phadke <i>et al</i> , 2014.....	p.42
Figure 17 :	
Changement dans la pyramide des revenus en Inde selon les différentes catégories sociales 2005-2025. Source : Ablett <i>et al</i> , 2007.....	p.43
Figure 18 :	
La classe moyenne : taille et distribution (en millions de personnes). Source : Kharas & Gertz, 2010.....	p.45
Figure 19 :	
Répartition de la consommation moyenne annuelle des ménages indiens (en %). Evolution de 1995 à 2025. Source : Beinhocker <i>et al</i> , 2007.....	p.45
Figure 20 :	
Demande énergétique en fonction des heures, en été et en hiver à Bombay et à Delhi. Source : Phadke <i>et al</i> , 2014.....	p.59
Figure 21 :	
Le réchauffement évité via l'amendement de Kigali, selon un scénario Business-as-Usual. Source : Zaelke <i>et al</i> , 2017.....	p.63
Figure 22 :	
Une adéquation ressources et les besoins. Source : Papillon, 2012.....	p.67
Figure 23 :	
Diagramme schématique d'un système de refroidissement à sorption. Source : Padigal <i>et al</i> , 2014.....	p.69
Figure 24 :	
Eco Cooler et son installation. Source : Nowshin, 2017.....	p.71

Table des tableaux

Tableau 1 :

Degré-Jour Refroidissement par an par pays et métropoles. Source : Phadke *et al*, 2014.....p.35

Tableau 2 :

Calendrier des étapes d'élimination des HFCs selon les groupes de pays sous l'amendement de Kigali. Source : EIA, 2016.....p.63

Liste des acronymes & abréviations

- AC - Air Conditionné
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- BaU - Business As Usual
- BEE - Bureau of Energy Efficiency
- CFC - Chlorofluorocarbures
- DJC - Degré Jour de Chauffage
- DJR - Degré Jour Refroidissement
- GES - Gaz à effet de Serre
- GWh – Giga Watt heure
- HCFC - Hydrochlorofluorocarbures
- HFC - Hydrofluorocarbures
- IPCC - Intergouvernemental Panel on Climate Change
- NRDC - Natural Resources Defense Council
- PAO – Potentiel d’Appauvrissement de la couche d’Ozone
- PRG - Potentiel de Réchauffement Global
- RAC - Room Air Conditionners
- SACO – Substances Appauvrissant la Couche d’Ozone
- TEWI – Total Equivalent Warming Impact
- TWh - Tétra Watt heure

Table des matières

Introduction générale	13
Introduction	13
Méthodologie générale.....	15
Chapitre I : La climatisation- Généralités	17
Qu'est-ce que la climatisation ?	17
Les évolutions connues et projections de la climatisation.....	19
○ Les Etats-Unis	20
○ La Chine	21
Chapitre II : La climatisation en Inde	23
L'Inde : informations pertinentes.....	23
L'énergie en Inde	25
Le secteur du bâtiment et principalement le résidentiel	27
Evolution de la climatisation et projections.....	28
Chapitre III : Eléments moteurs de la croissance de la climatisation et contexte de la tendance en Inde	33
La variabilité climatique.....	33
Description du contexte social indien en mutation, rôle joué par la classe moyenne et dynamique de consommation de masse.....	35
○ L'urbanisation	35
○ Electrification et accessibilité des prix	38
○ Augmentation des revenus	39
○ Le développement d'une classe moyenne et d'une consommation de « luxe ».....	42
Les pratiques sociales dans la consommation énergétique.....	46
Chapitre IV : Les impacts de la climatisation	51
Les impacts économiques	51
Les impacts sur la sécurité alimentaire.....	51
Les impacts sur la santé	52

Les impacts sur l'environnement.....	53
○ Les fluides frigorigènes	53
○ Augmentation des consommations d'électricité, problèmes infrastructurels et pressions sur le réseau électrique	57
○ L'effet d'îlot de chaleur urbain	59
Chapitre V : Les alternatives et solutions proposées.....	61
Politiques relatives aux fluides frigorigènes.....	61
○ Le Protocole de Montréal.....	61
○ Le Protocole de Kyoto et l'amendement de Kigali.....	62
Les substances alternatives	64
Les programmes de Standards et de Labels (S&L)	65
La climatisation solaire.....	66
○ Avantages et opportunités	66
○ Inconvénients et barrières.....	67
○ Fonctionnement et techniques	68
○ Les énergies renouvelables en Inde et « The National Solar Mission ».....	70
L' « Eco Cooler », le premier climatiseur sans électricité	71
En conclusion	72
Conclusion générale	75
Conclusion.....	75
Prolongements.....	78
Limites méthodologiques.....	79
Bibliographie	81
Annexes.....	93

Introduction générale

Introduction

Le réchauffement climatique est actuellement l'un des défis et des enjeux majeurs des sociétés et surtout des générations futures. Alors que la plupart des états semblent agir dans un même souci de « sociétés bas-carbone » et de réduction des émissions de « Gaz à Effet de Serre » (GES), les modes de vie actuels et les besoins humains entraînent des consommations d'énergie et des pressions conséquentes sur l'environnement et ses ressources naturelles.

En effet, le secteur de l'énergie, dépendamment de l'approvisionnement et du type de ressource, est un des secteurs problématiques en terme d'adaptation et d'atténuation au changement climatique. Cependant, c'est une pratique d'usage particulière qui attire et inquiète depuis peu la communauté scientifique mais également les politiques et les organisations internationales : la climatisation. Alors que les Etats-Unis, le Canada ou encore l'Europe semblent avoir acquis l'idée de « confort thermique » depuis un long moment, ce sont les pays en développement et principalement les économies émergentes qui semblent se tourner majoritairement vers cet équipement de froid artificiel, ces pays se situant dans des zones climatiques caractérisées par des températures moyennes annuelles élevées. La Chine, le Brésil, ou encore l'Inde vivent depuis plusieurs années une croissance économique et démographique significatives ainsi qu'une urbanisation croissante demandeuse de nouvelles infrastructures (Pellegrino *et al*, 2015). C'est donc dans de tels pays que l'utilisation de la climatisation via la pénétration de l'air conditionné semble de plus en plus s'ancrer dans les pratiques d'usage. Même si les habitants de la plupart des régions au climat chaud s'adaptent depuis toujours à des températures élevées par des pratiques efficaces (isolation des bâtiments, choix des matériaux, diminution des surfaces vitrées ou tenue vestimentaire adéquate), le refroidissement artificiel semble s'accélérer et non prêt de s'arrêter.

Mais les systèmes de climatisation ne sont pas sans effet, d'où l'intérêt de la problématique environnementale du mémoire ci-présent. L'air conditionné présente des impacts directs et indirects sur l'environnement, ceux-ci pouvant se diviser en deux grandes problématiques: le relâchement de fluides frigorigènes d'une part et la consommation électrique résultant de l'utilisation d'un tel équipement d'autre part. Les fluides frigorigènes, nécessaires pour le refroidissement de l'air, sont nocifs pour la couche d'ozone et également responsables du réchauffement des températures. Les GES autres que le dioxyde de carbone (CO₂) tels que le méthane ou le protoxyde d'azote par exemple, représentaient déjà 24% des émissions totales de GES en 2010 (Chaturvedi, Sharma, 2016) nécessitant une attention toute aussi particulière. Ensuite, la consommation énergétique imputable aux climatiseurs est responsable d'émissions de CO₂ associées ainsi que de pressions supplémentaires sur les réseaux électriques, déjà vulnérables dans d'importants pays comme la Chine ou l'Inde.

Plusieurs études affirment que l'air conditionné présenterait alors une mesure d'adaptation à la hausse des températures, les pratiques d'utilisation de chauffage et de climatisation seraient donc une fonction linéaire à ce phénomène. Si l'on prend pour référence le scénario Business as Usual (BaU) de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC), l'utilisation du chauffage est projetée pour augmenter d'ici 2030 et ensuite se stabiliser. A contrario, l'air conditionné représenterait encore une croissance relativement faible mais attendue à augmenter de manière

exponentielle (Van Vuuren et Isaac, 2009). Cela serait donc un parfait exemple de l'effet de « rétroaction positive » ou de cercle vicieux non maîtrisé entre énergie/électricité et climat : le climat se réchauffant, l'utilisation d'air conditionné (AC) augmente, relâchant des quantités significatives de CO₂, gaz bien connu pour contribuer à la hausse des températures (Auffhammer Mansur, 2014).

Cependant, et c'est là toute l'intention de ce mémoire, un rapport de l'IPPC affirme que la croissance de la climatisation au niveau global est imputable pour les trois-quarts au développement de la classe moyenne dans les marchés émergents et pour moins d'un-quart seulement au changement climatique (J.Unger, 2014). En effet, le mémoire ci-présent dépassera l'idée selon laquelle l'usage de la climatisation serait uniquement et principalement une mesure d'adaptation au réchauffement des températures et se focalisera plutôt sur l'aspect social et socio-économique de la croissance vécue dans un pays comme l'Inde. Car si la croissance de l'usage de la climatisation y est, si pas la plus importante, en tout cas la plus marquée et la plus problématique actuellement (Davis & Gertler, 2015), elle semble surtout être la résultante d'une urbanisation croissante, ainsi que d'une augmentation en volume et attentes de standards de vie d'une nouvelle catégorie sociale : celle de la classe moyenne indienne. D'autant que, si l'on compare avec les Etats-Unis qui présentent actuellement un taux de pénétration¹ de 90% de l'air conditionné dans les ménages, l'Inde, avec sa population quasiment quatre fois plus importante et des « Degrés Jour- Refroidissement »² (DJR) plus nombreux, présente un potentiel pouvant être jusqu'à douze fois plus grand que les USA, rendant les impacts environnementaux potentiellement alarmants (Davis & Gertler, 2015).

Aussi, alors que l'air conditionné est perçu dans les régions « occidentales » ou développées comme un équipement électroménager « de base » ou même indispensable (aux Etats-Unis ou à Singapour par exemple), celui-ci représente un bien de « luxe » dans les pays en développement et les économies émergentes, reflétant une distinction sociale importante, surtout dans une société comme la société indienne, déjà marquée par un système de « découpage » de la population selon des catégories bien définies (castes).

La problématique posée et développée dans ce mémoire s'inscrit donc tout naturellement dans un questionnement essentiel : **la climatisation est-elle indispensable?** Et à quel prix social et environnemental ? La réflexion ainsi que les questions de recherche sont alors multidisciplinaires, l'acquisition d'un système d'air conditionné pouvant trouver ses raisons et ses racines dans plusieurs domaines : économique, social, environnemental et énergétique. Cette croissance de la climatisation est-elle alors **une réelle mesure d'adaptation ou plutôt un désir de développement ? Dans quel contexte et quelle voie s'inscrit la tendance de la croissance de la climatisation en Inde**, avec quels impacts, que ceux-ci soient d'ordre environnemental, social ou économique ? Ou plus précisément, est-ce envisageable et tenable dans une optique de développement durable ? Et surtout, dans un scénario d'objectif de limitation de la température à 2°C (ou même à 1,5°C) par rapport aux températures de l'ère préindustrielle d'ici 2100 ?

¹ Taux de pénétration: *la mesure dans laquelle un produit est reconnu et acheté par les clients sur un marché particulier.* (Oxford Dictionaries), En ligne: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/penetration>.

² Degré Jour Refroidissement: *mesure utilisée pour déterminer la demande en air conditionné en calculant de combien de degré la température moyenne se situe au-dessus 18°C - et donc à quel point nous aurons besoin d'air conditionné pour maintenir le lieu à 18°C* (Lee et al, 2010).

L'analyse se concentrera particulièrement sur l'acquisition de l'air conditionné dans les ménages indiens, car il semble que la croissance la plus marquée se perçoive dans les lieux d'habitations, le climatiseur permettant notamment de pouvoir accueillir dignement les invités. Mais surtout car ce secteur résidentiel deviendrait petit à petit un consommateur majeur d'énergie, dépassant le secteur commercial ou industriel, traditionnellement pointé du doigt pour être fortement émetteurs de gaz à effet de serre, les ménages devenant un acteur de plus en plus déterminant en terme d'empreinte écologique et présentant les défis actuels majeurs que sont le changement climatique et l'approvisionnement énergétique (Letschert, 2008).

Méthodologie générale

Après avoir fait un tour d'horizon des différentes études et recherches sur les pratiques d'utilisation de l'air conditionné dans le monde, il apparaît assez vite que son utilisation varie selon les pays. L'état des connaissances existantes sur cet objet d'étude a permis de dégager des questions de recherches ciblées ainsi que de définir un cadre d'étude théorique précis. La démarche est donc la suivante : la réalisation d'une bibliographie la plus complète possible suivie d'une synthèse des informations jugées pertinentes ayant pour but de relever ce qui pourrait porter à réflexion. Enfin, les différents éléments récoltés seront confrontés afin de faire ressortir les convergences, les divergences ou les complémentarités de chacun.

De façon pratique, une forte mobilisation de sources et de données fut centralisée via les bibliothèques, les bases de données bibliographiques, les plateformes principales de journaux et périodiques électroniques (Cible+, Research Gate, Science Direct, Google Scholar,...). Des articles scientifiques mais aussi des rapports d'organismes internationaux, nationaux ainsi que ceux d'instances compétentes et reconnues furent également traités (Center of Sciences and Environment (CSE), Council on Energy, Environment and Water (CEEW), Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), World Bank, etc...). Cette recherche fut large, l'étude de la problématique étant intéressante à parcourir tant dans des contextes urbains que des territoires différents afin d'enrichir la réflexion. Enfin, la littérature grise fut utilisée de manière minimale et toujours avec un sens critique. Tout ceci permettant de mettre en évidence la variété d'acteurs et de secteurs liés à cette problématique. Le cas d'étude interdisciplinaire développé dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du master en Gestion de l'Environnement, alliant le domaine des sciences exactes à celui des sciences humaines et sociales, et traitant des données chiffrées en lien avec des données plutôt littéraires.

L'agencement du mémoire se déroulera en cinq parties. Après avoir cité les deux acteurs majeurs de l'évolution la plus rapide de la consommation de l'air conditionné que sont les Etats-Unis et la Chine, et avoir défini les quelques aspects importants de son utilisation, un chapitre entier se focalisera sur le cas indien ainsi que sur ses pratiques quotidiennes de refroidissement artificiel de l'air. Ensuite, un chapitre conséquent s'attardera sur les éléments moteurs de l'acquisition d'un bien comme le climatiseur, de manière générale mais surtout dans le contexte d'urbanisation et de mutation du système indien afin de bien comprendre les motivations d'une préférence d'un AC à une autre mesure d'adaptation. Ce chapitre présentera un aspect plus sociologique, intégrant les pratiques sociales dans les consommations énergétiques. Des études d'auteurs comme Elizabeth Shove seront mobilisées, afin de contourner l'idée selon laquelle l'AC serait uniquement la

conséquence d'une augmentation des moyens financiers mais présenterait une pratique propre à chacun et un besoin de distinction et de fierté d'obtention d'un tel bien. Le chapitre suivant s'attardera alors sur les impacts environnementaux, s'attardant plus sur les fluides frigorigènes et les consommations énergétiques. Enfin, ce mode de vie intensif en énergie aggravant très clairement l'empreinte environnementale des villes implique une recherche d'alternatives ou de solutions pouvant permettre une gestion durable et soutenable de ces centres urbains. Le dernier chapitre en exposera d'ailleurs quelques unes, d'ordre politique, technique, architectural ou institutionnel. Toutes les solutions ou alternatives n'ayant pu être développées ici, seules l'ont été celles qui semblaient les plus pertinentes.

Chapitre I : La climatisation- Généralités

Qu'est-ce que la climatisation ?

De manière synthétique, les systèmes de climatisation puisent de la chaleur dans un lieu clos (une pièce pour la climatisation individuelle ou un logement entier pour les climatiseurs centralisés) dont ils abaissent la température en rejetant la chaleur à l'extérieur (ADEME, 2015). De ce fait, le « conditionnement de l'air consiste à modifier la température et l'humidité de l'air diffusé, afin d'assurer le confort des usagers dans un lieu soumis à des apports et/ou des pertes de chaleur dû à l'usage et aux conditions climatiques » (Khalfallah *et al*, 2016, p.18). Le degré de pollution de l'air, de l'hygrométrie (taux d'humidité de l'air) et la teneur en poussières sont des caractéristiques supplémentaires régulées par les climatiseurs.

D'un point de vue général et schématique, un climatiseur se compose de deux principaux échangeurs : l'évaporateur et le condenseur. Un fluide frigorigène circule dans ce système de circuit fermé et étanche (ADEME, 2015).

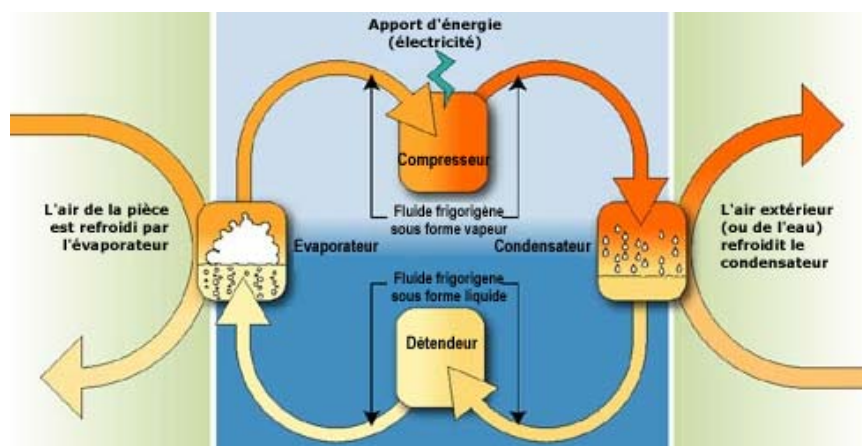


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un climatiseur traditionnel. Source : ADEME, 2015.

Les systèmes de climatisation sont considérés comme des équipements frigorifiques, eux-mêmes définis comme suit : « tout équipement de production de froid et de chaleur, mettant en œuvre un cycle frigorifique (à compression de vapeur ou à absorption) » (Cappellin, 2013).

Dès lors, le refroidissement d'un local s'obtient par « l'élimination des apports de chaleur qui sont absorbés par le fluide frigorigène qui circule dans l'évaporateur intérieur sous l'effet du compresseur intégré à l'unité extérieure. Le compresseur comprime alors le fluide qui, grâce à ses changements de phase peut transférer l'énergie frigorifique en saison chaude et calorifique en saison froide » (Khalfallah *et al*, 2016, p.18-19). C'est donc un mécanisme capable de contrer les charges thermiques (apports ou déperditions de chaleur externes et internes, en Kilowatts) et hydriques (apports d'humidité internes, en kilowatts) d'une pièce, en assurant un renouvellement de l'air neuf hygiénique.

En climatisation, deux termes ou « usages » s’opposent : la climatisation individuelle et la climatisation centralisée. Cette dernière se compose d’une unité de production de froid et d’un fluide pour distribuer l’énergie frigorifique dans différents endroits (ou pièces) tandis que la climatisation individuelle refroidit, elle, uniquement la pièce dans laquelle le système se trouve (Grignon Massé, 2010).

Ce mémoire se focalisera sur les systèmes individuels répartis en plusieurs sous-systèmes, selon leurs configurations de montage. A noter qu’ils peuvent être mobiles ou fixes (Grignon Massé, 2010 ; ADEME, 2015 ; Khalfallah *et al*, 2016) :

- Les climatiseurs monoblocs : les unités intérieures et extérieures ne sont pas séparées, elles se trouvent dans le même caisson. Idéaux pour rafraîchir une petite pièce, ils sont généralement peu puissants et assez bruyants.
 - o Climatiseurs mobiles (avec une puissance frigorifique entre 0,5 kW et 3,5 kW),
 - o Climatiseurs de type « fenêtre » : ces derniers s’encastrent dans une paroi à l’extérieur de la pièce à refroidir.
- Les splits systems : climatiseurs à éléments séparés reliés par un tube dans lequel circule le fluide frigorigène.
 - o Les splits simples : les unités intérieures et extérieures sont séparées et présentent une puissance frigorifique entre 1kW et 10kW,
 - o Les multi-splits : il y a plusieurs unités intérieures et une unité extérieure séparée, ce qui permet de climatiser plusieurs pièces en même temps. Ces systèmes sont des systèmes « centralisés » pour un logement entier.

Depuis des siècles, l’homme cherche à modifier les conditions de chaleur et d’humidité de son habitat en mettant en place divers systèmes de refroidissement dits « naturels ». Au fil des années, les notions de « confort thermique » se sont affinées avec des systèmes de plus en plus performants et techniques, jusqu’à l’invention de l’Américain Willis Haviland Carrier, considérée comme le premier climatiseur moderne se rapprochant le plus de ce que l’on connaît aujourd’hui. Celui-ci sera rendu public en 1925 et installé dans la célèbre salle de spectacle le « Rivoli Theater » à Times square, révolutionnant alors le mode de vie américain. La climatisation se verra progressivement généralisée de 1946 à 1975 lors de la période des Trente Glorieuses durant laquelle l’amélioration de la qualité de vie des ménages eut pour conséquence la multiplication de l’acquisition d’appareils électroménagers (ADEME, 2013).

Le rapport du Programme des Nations Unies pour l’Environnement (PNUE) distingue alors deux sortes de climatisation : la climatisation industrielle répondant aux exigences techniques et d’hygiène pour certains produits (notamment dans le domaine médical ou industriel) et la climatisation de confort, ayant pour objectif de rendre agréable (tout en restant hygiénique) l’atmosphère des habitations, des magasins,... (UNEP, 2014). Nous nous focaliserons sur cette deuxième utilisation de la climatisation, celle-ci représentant la croissance la plus marquée dans les pays en développement et surtout dans notre cas d’étude, l’Inde.

Les évolutions connues et projections de la climatisation

Au niveau mondial, les ventes pour l'année 2000 furent estimées à plus de 39,7 millions de climatiseurs, comprenant plus de 29 millions d'unités de « Room Air Conditionners » (RAC) ou climatisation individuelle contre 9 millions pour les équipements centralisés. Plus récemment, une étude de 2013 montre que le marché mondial de la climatisation se serait situé cette année-là, aux alentours de 60 millions d'équipements, ce marché étant principalement dominé par les firmes japonaises, américaines, coréennes et chinoises (Clodic, 2013). Plus récemment, l'Institute for Governance and Sustainable Development (IGSD) compte 900 millions d'équipements d'air conditionné sur le globe pour l'année 2015 (Zaelke & Piccolotti, 2015).

Enfin, pour ce qui concerne le marché européen, la climatisation individuelle est un besoin relativement récent, le taux de pénétration de la climatisation étant faible comparé à d'autres régions. Toutefois, ce domaine tend à augmenter de manière considérable depuis quelques années, les ventes se situant à 3,5 millions d'unités en 2005 contre 1,6 millions en 1996 (Grignon- Massé, 2010).

Ces brèves évolutions démontrent une croissance globale de l'utilisation de l'air conditionné. Si la tendance se maintient au niveau mondial, on assistera à une augmentation allant jusqu'à 700 millions d'unités d'AC d'ici 2030, ce chiffre pouvant même grimper jusqu'à 1,6 milliard pour 2050 (Shah *et al*, 2015). Pour cette même année, l'IGSD (Zaelke, Piccolotti, 2015) projette elle, un montant de 2,5 milliards d'unités. Associé à cela, la consommation énergétique à usage uniquement résidentiel pourrait passer de 300 TW/an en 2000 à 4000 TW en 2050, pouvant atteindre jusqu'à 10 000 TW en 2100 (IPCC, 2014, cité dans Henley, 2015).

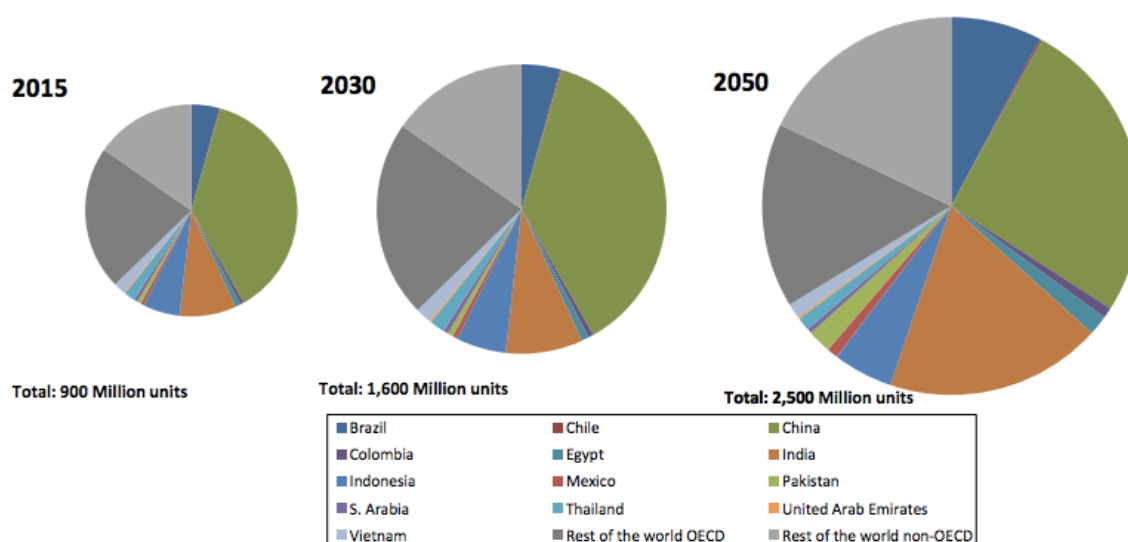


Figure 2 : Prévisions des stocks d'Air Conditionné au niveau mondial. Source : Shah *et al*, 2015.

D'après le 5^{ème} rapport de l'IPCC (2014), l'énergie utilisée pour la climatisation dans le secteur du bâtiment (commercial et résidentiel) réalisera, quant à elle, une augmentation de 84% pour la période 2010-2050.

C'est dans un cadre d'observation de la croissance de la climatisation dans les pays en développement que s'est construite l'analyse de ce mémoire. Car de manière générale, depuis c'est cinq dernières années, c'est une croissance de plus de 70% que connaissent ces pays³. Pour le Brésil par exemple, les ventes de climatiseurs augmenteraient chaque année de 20% (Shah, 2015). L'étude de Davis et Gertler (2015) démontre d'ailleurs que la proportion des ménages possédant la climatisation dans ces pays passera de 13% (en 2015) à 70% d'ici la fin du siècle. Ce qui représenterait des émissions annuelles de 23 millions de tonnes de GES !

Avant de se concentrer sur le cas précis de l'Inde, deux pays seront brièvement abordés : les Etats-Unis et la Chine. Ces deux puissances présentant les caractéristiques les plus pertinentes et les plus notables, l'un pour son taux de pénétration d'AC extrêmement élevé et l'autre pour son évolution rapide et exponentielle.

○ Les Etats-Unis

C'est aux Etats-Unis que les premiers systèmes de climatisation moderne furent installés. La notion de « confort thermique » ainsi que la réfrigération domestique fait d'ailleurs aujourd'hui partie intégrante du mode de vie nord-américain (Ross, 2012). Cependant, dans les années 50, ces équipements étaient installés uniquement dans les lieux publics comme les cinémas ou les supermarchés, le pourcentage de ménages possédant un tel équipement n'atteignait alors que 2% pour l'année 1955. Mais trente ans plus tard, dans les années 80, ce taux avait déjà considérablement augmenté, atteignant les 50% (Peterson, 2015). Pour l'année 2015, l'étude de Davis et Gertler (2015) avance que trois ménages sur quatre possédaient un climatiseur, l'énergie consommée étant égale à 5% de l'électricité totale consommée aux Etats-Unis.

Sachant cela, il est intéressant de préciser que les zones d'acquisition sont assez hétérogènes, les états du Texas ou de la Floride présentant des taux de pénétration de l'AC de 90%, comparativement à d'autres états où ce taux est extrêmement bas (Auffhammer, Mansur, 2014). En effet, dans le Sud du pays, la température excédant les 40°C en journée et redescendant à peine la nuit, 97% des foyers bénéficient d'un climatiseur. Certains états comme l'Arizona par exemple, oblige même les propriétaires à équiper leurs logements d'un système de climatisation (Bréville, 2017).

De plus, l'enquête du Residential Energy Consumption Survey (RECS) de 2011, publiée par l'EIA (EIA, 2011), étudie les différents types de systèmes d'air conditionné en comparant le système central de climatisation et les « Room Air conditioners » (RAC). En fonction des régions, leurs utilisations diffèrent, le système central étant plutôt apprécié dans les régions du Sud, du Midwest et de l'Ouest des Etats-Unis tandis que les RAC seraient plus généralement utilisés dans

³ Daikin Industries. *Market Potential*. En ligne : http://www.daikin.com/about/why_daikin/rise/

le Nord Est. A titre d'exemple, 69% des logements utiliseraient des équipements centraux au New-Jersey contre 28% à New-York.

Enfin, il semblerait que seulement 18% des ménages dont le revenu se situe en-dessous du seuil de pauvreté ne possèderaient aucun système de climatisation, que 15% des ménages ayant un revenu supérieur à 100 000 USD par an seraient équipés d'un système de conditionnement d'air de type RAC contre 75% qui préféreraient la climatisation centrale. Quant aux plus faibles revenus, seul un tiers des ménages possèderaient un système RAC (EIA, 2011).

○ La Chine

Comment ne pas citer la Chine lorsque l'on se penche sur les évolutions d'acquisition et d'utilisation de l'air conditionné ? En effet, la Chine représente certainement l'évolution la plus notable en terme de « confort thermique », conséquence d'une urbanisation rapide et de l'émergence d'une classe sociale moyenne désireuse de posséder différents types de biens (Auffhammer, 2014).

En 1990, moins de 1% des ménages chinois possédaient un climatiseur, ce taux atteignant les 62% en 2003 puis les 95% déjà en 2007 (Henley, 2015), représentant alors 10% de la consommation totale des ménages chinois (Koizumi, 2007). En 1995, il y aurait eu l'équivalent de dix climatiseurs acquis par 100 ménages, ce chiffre augmentant à plus de septante climatiseurs pour 2005 (Allaire, 2007) et à 120 plus récemment, les ménages possédant alors plus d'un système par pièce (Auffhammer, 2014 ; Shah *et al*, 2015). En 2010 ce seront plus de 50 millions d'équipements à usage résidentiel qui seront vendus dans tout le pays (Letschert *et al*, 2008 ; Sivak 2013). Depuis, les ventes auraient quasiment doublées, avec plus de 60 millions de systèmes d'air conditionné vendus actuellement chaque année, représentant plus de huit fois ce qui est vendu annuellement aux Etats-Unis (Davis & Gertler, 2015).

La Chine est régulièrement citée quand il s'agit de la consommation énergétique liée à l'utilisation de systèmes d'AC. Le « confort thermique » semble être un de leurs enjeux majeurs. Les deux tiers des consommations énergétiques du bâtiment seraient sollicités pour le chauffage et la climatisation, bien que le réseau chinois soit presque quasiment trois fois moins efficace que celui d'autres pays en développement, à climat similaire (Allaire, 2007).

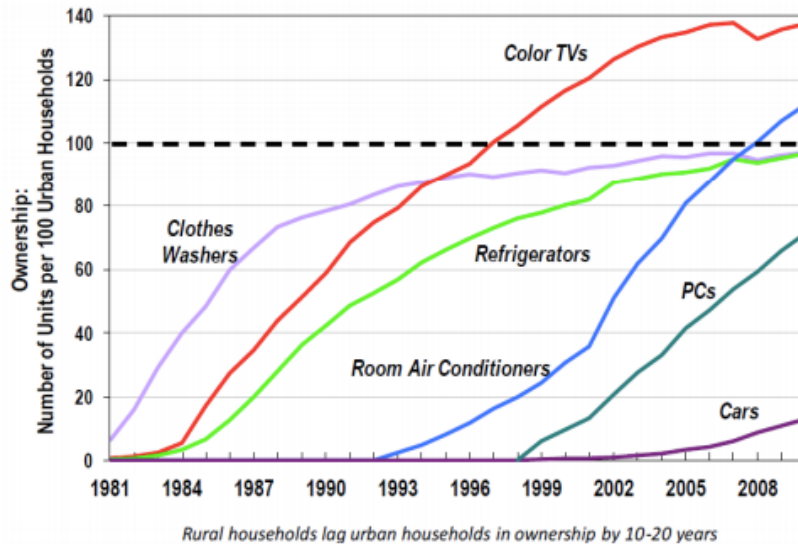


Figure 3: Pénétration des appareils clés dans les ménages urbains chinois entre 1981 et 2010. Source : Phadke et al, 2014

Il est important de préciser que la Chine reste le producteur principal de réfrigérants et un des plus gros consommateurs d'hydrochlorofluorocarbures (HCFC) (gaz nocifs pour l'environnement qui seront développés postérieurement) et qu'elle représente aussi le plus grand marché de fabrication de climatiseurs du globe, avec une production de pas moins de 80% de ces équipements (Zhao *et al*, 2015). Bien que non développée dans ce mémoire, cette affirmation introduit donc une problématique supplémentaire qui est celle de la distance des transports. A l'heure de la mondialisation et de l'éviction des frontières pour quasiment toutes les marchandises, les impacts environnementaux liés aux transports ne sont plus à démontrer. Vu la place prédominante de la Chine sur le marché des climatiseurs, les émissions de CO2 relâché entre la Chine et les potentiels pays acheteurs pourraient donc avoir un impact important sur l'environnement.

Chapitre II : La climatisation en Inde

Ce chapitre s'attardera sur le cas de l'Inde, étudiant les données récentes et futures relatives à sa croissance économique, sa croissance démographique, la situation énergétique du pays et principalement les évolutions de l'utilisation de la climatisation. Concernant les usages de cet équipement et la proportion que cela représente en Inde, le choix s'est porté sur l'analyse du secteur résidentiel. En effet, nous développerons postérieurement le concept de « classe moyenne croissante » et les désirs d'acquisition d'un bien de luxe associés à cette catégorie sociale, car il semble que ce soit dans ce secteur que la croissance de la climatisation est la plus flagrante.

L'Inde : informations pertinentes

L'Inde tend à devenir l'une des économies émergentes les plus prometteuses du monde mais aussi l'une des plus complexes, de par son poids économique et son poids démographique. Acteur incontournable de la scène diplomatique internationale mais aussi dans les négociations sur le climat.

L'Inde se place actuellement en deuxième place en terme de population, avec près de 1,331 milliards d'habitants en 2016, représentant près de 18% de la population mondiale, et plaçant le pays quasiment à égalité avec la Chine (1,381 milliards) (IEA, 2016). Selon une projection d'une augmentation de 20 millions de personnes par an, l'Inde pourrait devenir le pays le plus peuplé au monde d'ici 2025 (Remme *et al.*, 2011). Cette évolution s'accompagnant sans doute de modifications dans la pyramide des âges, composée probablement d'une population jeune et d'un nombre important de personnes actives (15-60 ans). La main d'œuvre sera donc plus importante grâce à une population en âge de travailler (croissant de + 1,7% par an) (Chauvin et Lemoine, 2004).

En effet, depuis plusieurs années, l'Inde compte parmi les nouveaux pays industrialisés, le pays étant la 9^{ème} puissance économique mondiale en dollars courants pour l'année 2015, selon les données du Fonds Monétaire International (FMI). Son Produit Intérieur Brut (PIB) de 2183 milliards de dollars, mais surtout de 8728 milliards en Parité de Pouvoir d'Achat (PPA)⁴, le place à la troisième place mondiale après les Etats-Unis et la Chine. A noter que le pays reste malgré tout un des plus pauvres en terme de PIB/habitant⁵.

En 2015-2016, le taux de croissance de l'Inde a atteint les 7,3%. Cela signifie que si cette tendance se maintient, l'Inde pourrait devenir l'une des quatre premières économies au niveau mondial d'ici une vingtaine d'années.

L'Inde n'échappe pas non plus au phénomène de réchauffement climatique qui persiste et s'intensifie. D'après le 5^{ème} rapport de l'IPCC, l'Inde s'est réchauffée de 0,6°C au cours des 112

⁴ Parité de pouvoir d'achat: « taux de conversion monétaire qui permet d'exprimer dans une unité commune les pouvoirs d'achat des différentes monnaies » (Institut national de la statistique et des études économiques, s.d)

⁵Données de la Banque Mondiale. En ligne : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?langue=fr&codePays=IND&codeStat=NY.GDP.MKTP.KD&codeStat2=x>

dernières années. L'IPCC confirme d'ailleurs une forte corrélation entre son réchauffement climatique et les émissions anthropiques de CO₂ (Jaiswal, 2015).

Sans oublier que pour l'année 2009, le pays est après la Chine et les Etats-Unis, l'un des plus gros émetteurs de CO₂. Ses émissions de 593 millions de tonnes équivalent CO₂ (MtCO₂eq) correspondant à 2,8% des émissions globales en 1990, ont presque triplées en 2009, avec 1 548 MtCO₂eq (5,4% des émissions globales) (Ahn *et al*, 2012). Cette croissance est plus élevée que la moyenne mondiale, due à une forte consommation d'énergies fossiles, principalement le charbon, celui-ci étant responsable de 67% de l'augmentation des émissions de CO₂ de 1990 à 2009. Néanmoins, en terme d'émissions de GES/habitant l'Inde reste l'un des pays les plus faibles. Avec 1,4 tonne de CO₂ par habitant en 2010, ce taux d'émission représente moins d'un tiers de la moyenne mondiale qui est de 4,5 tonnes de CO₂ par personne (Paugam *et al*, 2015). Pour exemple, un indien émettrait en moyenne 17 fois moins qu'un Américain et 5 fois moins qu'un Français (Greenpeace, 2015). Certains scénarios estiment que d'ici 2035, malgré sa forte croissance démographique et économique, les émissions de carbone par habitant en Inde resteront malgré tout assez faibles, atteignant seulement 2,34 tCO₂/habitant contre 4,25 tCO₂/habitant de moyenne mondiale projetée (Ahn *et al*, 2012). Cette faible consommation de GES par habitant s'explique par une pauvreté importante de la population et un faible accès à l'électricité (300 millions d'indiens n'en bénéficient pas encore à l'heure actuelle) (Padigal *et al*, 2014).

L'Inde s'engage à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de -33% à -35% par point de PIB d'ici 2030 par rapport au niveau de 2005 et à atteindre 40% de puissance électrique installée issue d'énergies renouvelables d'ici 2030. En effet, depuis la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement à Stockholm en 1972 ainsi qu'à Rio en 1992, l'Inde tente de faire de ces questions environnementales une priorité.

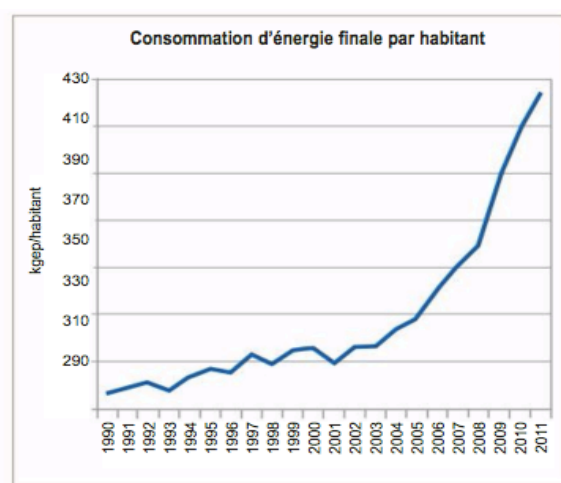
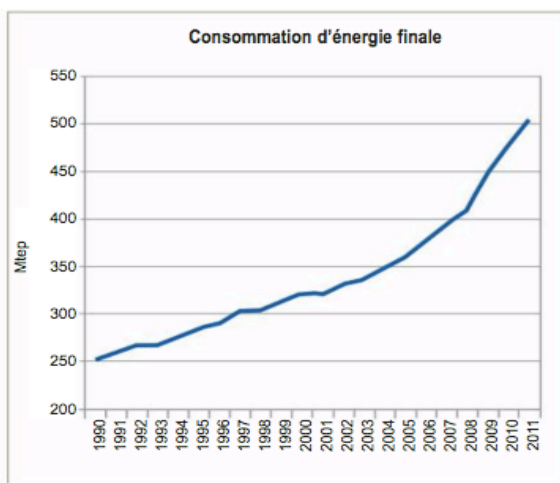
Enfin, il semble important de décrire en quelques lignes le climat diversifié de l'Inde. Résultant de sa taille géographique et de sa topographie, l'Inde présente des zones climatiques variées, allant du climat tropical (à chaleur humide ou sèche) au climat tempéré et même alpin. Ci-dessous une carte décrivant les zones climatiques et leurs températures moyennes annuelles, permettant d'observer que celles-ci se situent majoritairement entre 22,5°C et plus de 27.5°C (Maps of India, 2014).



Figure 4: Température annuelles en Inde. Source : Maps of India, 2014.

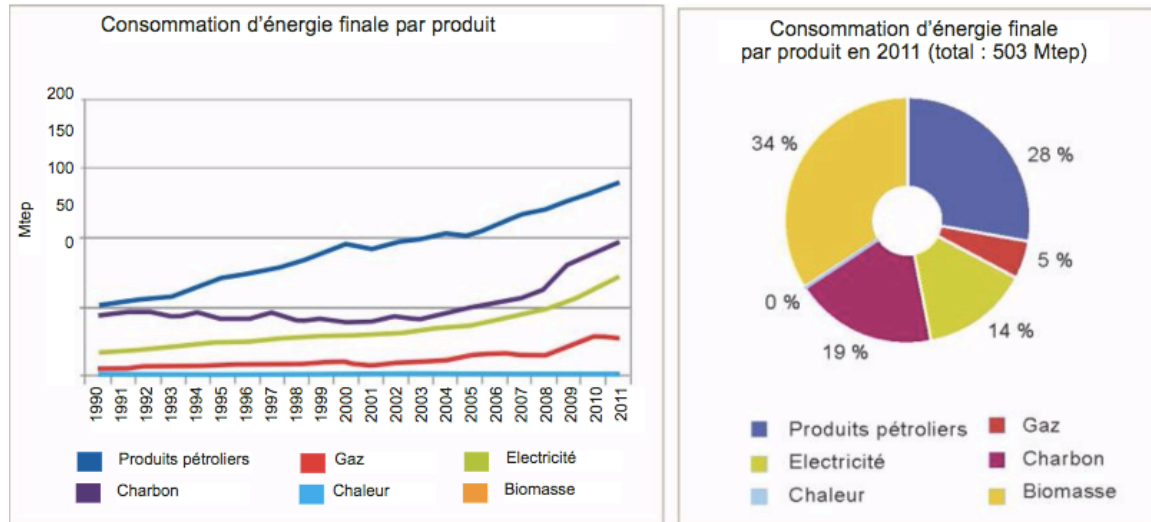
L'énergie en Inde

La consommation d'énergie finale en Inde a atteint les 503 millions de tonnes équivalent pétrole en 2011, celle-ci augmentant selon une moyenne de 3,4% par an et ayant doublé depuis 1990. Mais c'est surtout la consommation d'énergie finale par habitant qui a grimpé ces dernières années, à hauteur de + 43% depuis les années 1990 (Chappoz & Laponche, 2013).



Figures 5 et 6 : Consommation d'énergie finale et consommation d'énergie finale par habitant. Source : Chappoz & Laponche, 2013.

L'électricité dans la consommation finale énergétique indienne représente 14,2% en 2011, quatre fois ce qu'elle représentait en 1990, avec une augmentation significative ces dernières décennies. Cette augmentation entraîne cependant un risque de déficit de production causé par un écart entre la demande et la production électrique.



Figures 7 et 8 : Consommation d'énergie finale par produit. Source : Chappoz & Lafonte, 2013.

Toutefois, la demande en électricité domestique varie selon l'état et le territoire. En effet, en 2007, la capitale, Delhi, représentait la demande en électricité la plus conséquente, avec environs 424 kWh/habitant. A contrario, la demande la plus minime fut à Bihar (situé à l'Est) avec seulement 18 kWh/habitant. A titre de comparaison, la moyenne nationale se situe aux alentours de 106 kWh/habitant en 2007, et surtout la moyenne de la consommation électrique résidentielle des Etats-Unis se situe à 4 615 kWh/habitant, de l'OCDE Europe à 1 595 kWh/habitant et enfin pour la Chine à 281 kWh/habitant (Remme, 2011)

L'augmentation de l'offre énergétique est un impératif mais n'est pas sans certaines contraintes. Cette offre énergétique est fortement dépendante des importations, 40% de l'offre énergétique commerciale provenant de combustibles importés. C'est le cas également du charbon, fournissant 70% de l'électricité, dont l'importation passerait de 10% en 2011-2012 à 30% en 2027. Ensuite, le secteur de l'énergie est le plus gros émetteur de GES en Inde, responsable de l'émission de 1 100,06 millions de tonnes équivalent CO₂ en 2007, sur un total de 1 904, 73 millions de tonnes. 65,4% de ces émissions provenaient de la production d'électricité (Paugam *et al*, 2015).

En fonction des modèles, les projections diffèrent, mais de manière générale, il semble que, si l'on considère une croissance économique entre 8 et 9% jusqu'en 2031-2032, cela nécessitera de multiplier par quatre ou cinq l'offre énergétique primaire de l'Inde et par six ou sept sa capacité de production électrique par rapport au niveau de 2003-2004 (Paugam *et al*, 2015). Et ce, afin d'éviter une fragilisation des réseaux électriques encore plus élevée.

Le secteur du bâtiment et principalement le résidentiel

D'après le dernier rapport de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), le secteur du bâtiment aurait été responsable de 9,18 GtCO₂ équivalent d'émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau mondial en 2010 (pas moins du double de ce qui était émis en 1970). Représentant environ un cinquième du total des émissions de CO₂ tous secteurs confondus, cela équivaldrait à 32% de l'utilisation d'énergie finale totale, 24% associés au résidentiel contre 8% au secteur commercial. Ce chiffre pourrait doubler et même tripler d'ici 2050 (IPCC, 2014). Rien qu'en Inde, ce secteur du bâtiment, que ce soit dans le domaine commercial ou le domaine résidentiel, représenterait 29% de la consommation totale d'énergie du pays (Padigal *et al*, 2014). Le secteur résidentiel serait, le troisième consommateur énergétique (Pellegrino *et al*, 2016). Pour illustration, en 2014, c'est l'équivalent de 225 TWh que le secteur résidentiel aurait consommé en énergie finale. Sa consommation actuelle à augmenter considérablement, en raison principalement d'un taux d'urbanisation important et d'une augmentation d'équipements consommateurs d'électricité, comme le climatiseur. En effet, l'énergie requise pour rafraichir les bâtiments pourrait croître considérablement et plus rapidement que toutes les autres demandes énergétiques du secteur (Jaiswal, 2015).

En outre, il est intéressant de préciser que certaines conceptions de bâtiments peuvent être responsables d'une augmentation des besoins de refroidissement émanant d'une impossibilité d'ouvrir les fenêtres ou de la quantité des surfaces vitrées par exemple (Grignon Massé-2010). En abordant cet aspect, il est utile de se pencher sur un classement des différents types de bâtiments dans les zones urbaines indiennes. Car ces différentes typologies induisent souvent l'introduction de pratiques de refroidissement artificiel de l'air plutôt qu'une climatisation dite « passive » utilisée traditionnellement par les habitants pour faire face aux aléas climatiques (Thomas *et al*, 2010) :

- les espaces naturellement ventilés, sans systèmes de chauffage ou de climatisation autre que les ventilateurs de plafond. Cette catégorie correspond aux anciens bâtiments qui s'adaptent aux conditions climatiques de manière traditionnelle ;
- les bâtiments naturellement ventilés mais qui possèdent tout de même un système d'air conditionné à utiliser uniquement en cas d'inconfort élevé suite à des conditions climatiques extrêmes ;
- les bâtiments de bureaux de type « Grade A » désigné par l'étude comme le « Dubai Style ». Ce sont des bâtiments contemporains qui se développent fortement depuis quelques années, aidés par l'urbanisation indienne et les normes de confort dictées par l'American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) et les normes ISO non conformes au climat local. Ceux-ci sont caractérisés par une faible isolation et une consommation intensive de l'air conditionné ;
- Les bâtiments contemporains mais possédant des climatiseurs efficaces, avec une bonne performance énergétique ;
- Les bâtiments « verts », où l'attention est portée sur la bonne performance énergétique, des utilisations passives de type ventilation naturelle et possédant un système d'air conditionné performant à utiliser uniquement lors des épisodes climatiques extrêmes.

C'est donc bien le secteur du bâtiment qui peut être considéré comme étant au cœur des problématiques énergétiques et représentant le plus de défis pour une gestion durable⁶.

Evolution de la climatisation et projections

➤ Evolutions connues

Actuellement, l'Inde n'est pas encore considéré comme un pays fortement consommateur d'air conditionné. En 2015, entre 2 et 4% des ménages possédaient un tel système (Peterson, 2015 ; ISHRAE, 2015). A l'époque, c'était plutôt les équipements de type « refroidisseurs d'air » qui étaient les plus utilisés, contrairement aux systèmes de climatisation (Remme *et al*, 2011). En 2006 par exemple, rien que dans le secteur résidentiel, 22,5 millions de refroidisseurs d'air étaient installés pour seulement 2 millions d'unités d'air conditionné (Remme *et al*, 2011), représentant une consommation de 2 308 GWh pour ces derniers (Palakshappa, 2013). En 2011, ce chiffre passait déjà à 5 millions, l'énergie totale consommée par ces équipements représentant alors 5 099 GWh (Palakshappa, 2013).

Pour précision, les refroidisseurs d'air seraient plus efficaces que les ventilateurs et moins onéreux que les climatiseurs (CSE, 2016). Le rafraichisseur d'air utilise le principe de rafraichissement adiabatique permettant d'abaisser la température ambiante de la pièce, « si de l'air chaud et sec traverse un filet d'eau (tampon), il en provoque l'évaporation. La chaleur nécessaire à la vaporisation d'eau étant extraite de l'air. Celui-ci se refroidit »⁷. L'air subit donc un refroidissement modéré mais non contrôlé, contrairement à la climatisation qui maintient la température de la pièce (ADEME, 2015).

Le refroidissement artificiel de l'air via les climatiseurs (7%), les ventilateurs ou les refroidisseurs d'air (« evaporative cooler ») représenterait 45% de la consommation totale d'électricité résidentielle alors que 28% seraient mobilisés pour l'éclairage (Remme *et al*, 2011).

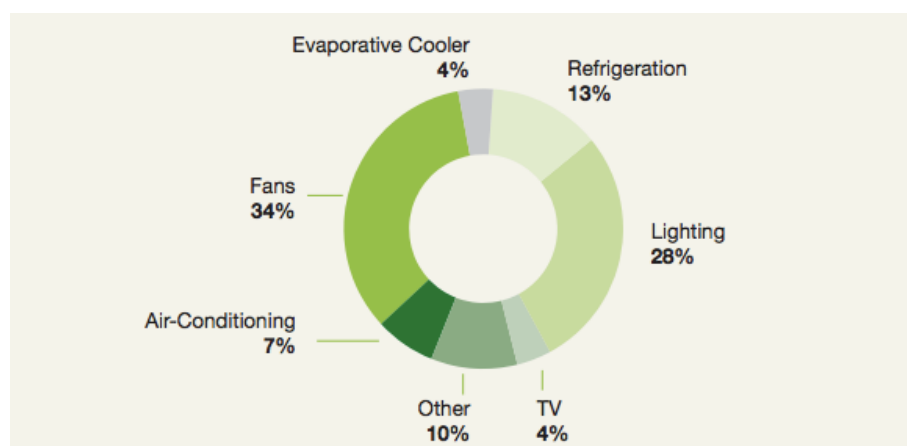


Figure 9: Modèle de consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel indien. Source : Padigal *et al*, 2014.

⁶ <http://www.mediatorre.org/afrique/actu,20150525155743.html>

⁷ <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18253#c20966293>

A l'observation des projections de croissance économique, du changement dans les standards de confort ainsi que du phénomène d'urbanisation, force est de constater qu'une croissance non négligeable de la climatisation s'opère principalement dans les ménages, le taux de pénétration augmentant plus vite que pour le secteur commercial (Phadke *et al*, 2014 ; CSE, 2016). De fait, les auteurs McNeil et Letschert (2008) affirment que depuis 2005, le nombre de ménages possédant un système d'air conditionné augmente à un taux de 15-17% par an (excepté pour l'année 2011 où ce taux aurait légèrement chuté) (Phadke *et al*, 2014).

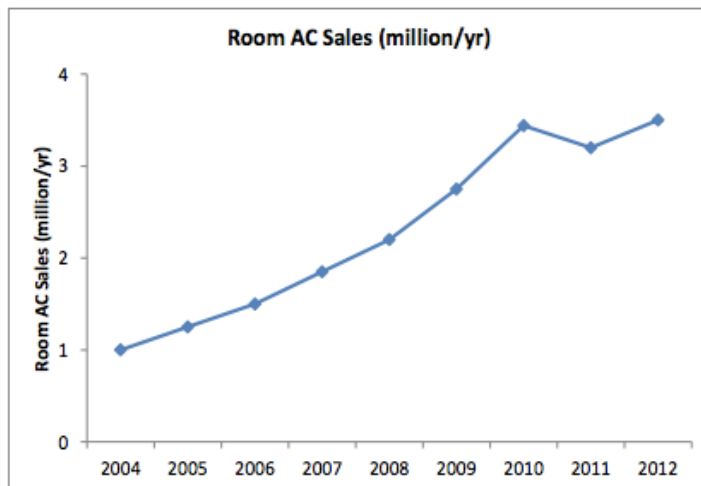


Figure 10 : Ventes des climatiseurs de type individuelle (splits et type « fenêtre ») en Inde. Source : Phadke *et al*, 2014

Les estimations générales pour l'Inde font apparaître une augmentation de 26,7% des achats de systèmes d'air conditionné pour la période 1990-2015 (Pellegrino, 2013). D'après l'Indian Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ISHRAE), ce sont les systèmes de Room Air Conditioners (RAC) soit la climatisation individuelle, qui sont principalement responsables de la croissance, représentant 61% des ventes de climatiseurs en Inde et présentant une croissance des ventes de 15% annuellement⁸. En effet, le marché des RAC comprenant, entre autres, les systèmes d'air conditionné de type « fenêtre » et les splits systems, serait passé de 3,8 millions en 2013 à 4 millions un an plus tard, ce nombre tendant à augmenter de 10% pour les cinq prochaines années (ISHRAE, 2015 ; CSE, 2016). Autrement dit, 70% des RAC vendus seraient des splits systems (plus efficaces au niveau énergétique que les airs conditionnés de type « fenêtre ») contrairement à il y a quelques années, où ces derniers dominaient le marché (Palakshappa, 2013 ; Phadke *et al*, 2014).

⁸ Août 2014. En ligne : <http://www.cleanenergyministerial.org/News/sead-and-india-bureau-of-energy-efficiency-host-workshop-on-enhancing-space-cooling-efficiency-and-demand-response-565>.

➤ Projections

L'évolution des acquisitions et de l'utilisation de l'AC en Chine a été brièvement exposée plus haut. Afin de mettre en perspective les projections possibles pour l'Inde, un parallèle entre les deux pays a été réalisé dans le graphique ci-dessous. Un premier indicateur représente les différentes évolutions des équipements ménagers en Chine (télévisions, réfrigérateurs, machines à laver et climatiseurs) avec un plafond se situant à plus d'un équipement par ménage (dépassé par la Chine après 2007 pour ce qui est des AC). Un deuxième indicateur représente la situation indienne qui, à l'année 2011, se situait plus ou moins au même niveau d'acquisition que ce que présentait la Chine pour les années 1991-1996.

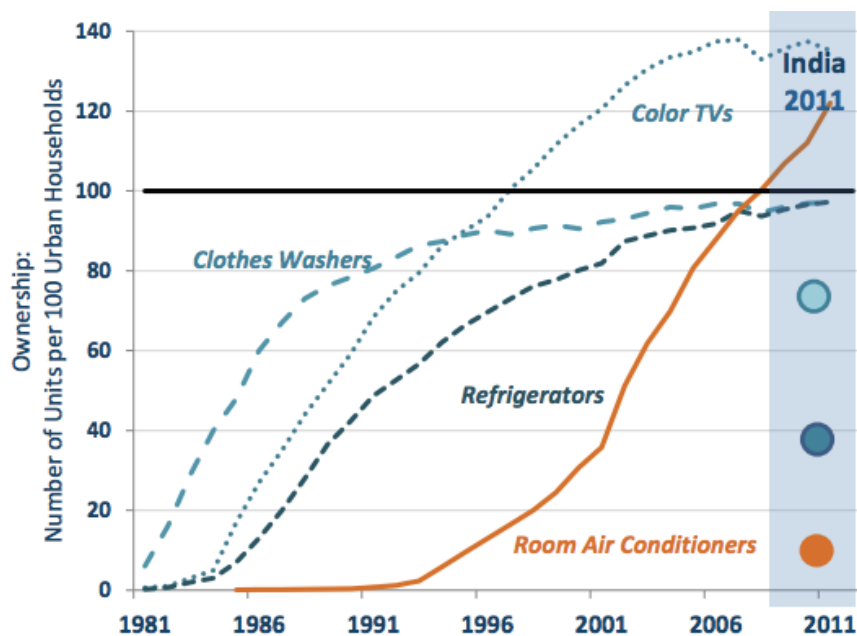


Figure 11: Croissance des équipements en Chine et comparaison avec la situation indienne en 2011. Source : Shah *et al*, 2015.

Alors qu'en 2011, sur le territoire chinois, environ 120 climatiseurs sont acquis par 100 ménages (Shah *et al*, 2015), l'Inde n'est qu'à 10 climatiseurs par 100 ménages. Ce graphique permet de faire des corrélations et des extrapolations, notamment entre l'acquisition d'un système d'air conditionné et les revenus par habitant. Si l'on reprend l'année 2007, la Chine se situe à environ 100 climatiseurs pour 100 ménages. En traduction PIB/habitant (en dollars constants 2005), celui-ci se situe à 5 224 USD. Parallèlement, ce n'est qu'en 2021 que le PIB/habitant en Inde se situera au même niveau. En 2030, l'Inde pourrait voir son PIB/habitant augmenter à 8 787 USD un montant proche de celui de la Chine pour l'année 2013, année où le pays possédait déjà plus d'un climatiseur par ménage. Cette comparaison permet alors de projeter la possible évolution de l'acquisition de climatiseur en Inde, si celle-ci poursuit les tendances observées en Chine (Phadke *et al*, 2014).

Pour compléter, une étude du Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) (Phadke, 2014) projette que la proportion de ménages urbains indiens possédant un système d'air conditionné serait de 20% en 2020 et de 73% en 2030, et que d'ici 2030, 60% des espaces commerciaux seraient climatisés et quatre ménages sur dix possèderaient un système de climatisation (Gupta *et al*, 2009). La consommation énergétique associée à cet accroissement passerait de 8 TWh/an en 2010 à 239 TWh/an pour 2030 (attribuée approximativement à 116 millions d'unité d'AC en service) (Phadke, 2014) représentant, uniquement pour la climatisation indienne, l'équivalent de la moitié de ce que consomme un pays comme la France en 2015 (RIE, 2015).

L'étude du LBNL de 2012 avançait que, pour répondre à cette hausse, il faudrait construire l'équivalent de 300 nouvelles centrales électriques à charbon de 500 MW chacune ! Reprenant ces données, l'étude de 2014 du même centre (Phadke *et al*, 2014), en considérant les options de conception pouvant être directement appliquées dans les technologies disponibles sur le marché (sans nécessité de changer la configuration totale du produit par exemple), conclu que l'efficacité pourrait être améliorée de 40% et cela de manière rentable. Ceci se traduisant par une économie d'énergie lors de pics de consommation pouvant aller jusqu'à 60 GW d'ici 2030, l'équivalent de 120 centrales à charbon de 500 MW chacune non construites (Phadke *et al*, 2014).

Pour finir, l'étude du Natural Resources Defense Council (NRDC) (Palakshappa, 2013) affirme que les facteurs prédominants de cette croissance sont l'augmentation du nombre de ménages et du niveau de revenu et la diminution du nombre de personnes par ménage (Lucon *et al*, 2014), l'accès à une électricité à bas prix dans les buildings résidentiels et accessibles à une nouvelle catégorie sociale qui est celle de la classe moyenne et des climats indiens caractérisés par des saisons à hautes températures et humidité.

Chapitre III : Eléments moteurs de la croissance de la climatisation et contexte de la tendance en Inde

Les motivations d'acquisition et de consommation d'un système tel que celui de l'air conditionné dépendent d'un bon nombre de facteurs incitatifs. Ceux-ci peuvent être d'ordre physique (la variabilité climatique), d'ordre démographique, économique (accessibilité des équipements, diminution des prix,...) et même social (lié au statut, à la perception du « confort thermique »,...).

L'impact de la variabilité climatique sur l'acquisition d'un climatiseur sera d'abord analysé, suivi ensuite d'une description du contexte social indien en mutation. Un volet sur la sociologie de l'énergie et ses pratiques sociales sera également développé afin de comprendre les tenants et les aboutissants de cette tendance croissante.

La variabilité climatique

Le climat est depuis longtemps considéré comme un facteur prépondérant dans la consommation d'énergie en ville, que ce soit pour contrôler la température, l'humidité relative ou encore la radiation solaire (Fung *et al*, 2006). La température extérieure ambiante représenterait alors un facteur pertinent influençant la demande en énergie (Izquierdo *et al*, 2011).

La mesure principalement utilisée pour établir une corrélation entre la température ambiante et l'utilisation de l'air conditionné est le « Cooling Degree Day », ou « Degré-Jour de Refroidissement » (DJR). Celui-ci se définit comme une mesure utilisée pour déterminer la demande en air conditionné en calculant de combien de degré la température moyenne se situe au-dessus de 65 degrés Fahrenheit (égal à plus ou moins 18°C) - et donc à quel point nous aurons besoin d'air conditionné pour maintenir le lieu à 65 degrés Fahrenheit. Il y aurait alors un lien évident et significatif entre la notion de DJR et la consommation d'électricité pour les mois les plus chauds (Lee *et al*, 2010). L'augmentation de la température extérieure entraînant l'augmentation des besoins en refroidissement, proportionnels aux DJR (Khalfallah *et al*, 2016 ; Henderson, 2005).

Ces degrés-jours de refroidissement sont calculés à partir de données de températures journalières. Ce qu'on appelle une « zone de confort » au niveau thermique se situerait entre 18°C et 22°C sans chauffage ni climatisation. Les degrés-jours se calculent comme suit :

- Degrés-jour de chauffage (DJC) = $T_{18} - T_j$
- Degrés-jour de refroidissement (DJR) = $T_j - T_{22}$

Où

T_j : la température journalière

T_{22} : le seuil de 22°C au-dessus duquel débute la demande de refroidissement

T_{18} : le seuil à 18°C au-dessous duquel débute la demande de chauffage.

A titre d'exemple, dans une étude de 2003 (Pavlova, Sailor, 2003), les auteurs reprennent les données du taux de pénétration des systèmes d'air conditionné de trente-neuf villes aux Etats-Unis pour vérifier de manière empirique leurs liens avec la notion de « Cooling Degree day ». Les

résultats démontrent que la consommation énergétique augmenterait de 2% à 4% pour chaque degré Celsius plus chaud. Lee *et al* (Lee *et al*, 2010) avancent également que, de manière générale, la consommation énergétique par unité de DJR aurait augmenté entre 1970 et 2000, principalement sous l'effet de standards de vie plus élevés et d'une popularité grandissante de l'air conditionné. Pour les régions au climat plutôt modéré, l'étude d'Aebischer (Aebischer, 2007) atteste que l'impact du changement climatique pourrait également être déterminant. D'après l'auteur, le nombre de jours considérés comme « inconfortables » est assez faible, la nécessité de refroidissement via un équipement d'air conditionné l'est donc également. La conséquence serait qu'« une augmentation, même faible, des températures extérieures pourrait changer ce constat car le nombre d'heures et de jours qui sont actuellement un peu en dessous du seuil de refroidissement pourraient se déplacer au dessus de celui-ci » (Aebischer, 2007, p.859).

Il faut cependant préciser que cette corrélation ne peut être pertinente qu'essentiellement au niveau global car au niveau régional, l'impact du changement climatique est distribué de manière inégale sur l'ensemble du globe (en fonction des régions tempérées ou tropicales, il y aura une diminution ou une augmentation de l'énergie liée à l'AC,...). De plus, ces inégalités se creusent à différentes périodes de l'année, que l'on se situe à l'hémisphère Nord ou à l'hémisphère Sud (Van Vuuren, Isaac, 2009).

La notion de DJR peut alors sembler pertinente pour un pays comme l'Inde, qui présente une grande variété de climats (semi-aride, tropical sec ou humide, désertique, ou de montagne) principalement caractérisés par de longues périodes de forte chaleur (à Delhi par exemple, l'été se prolonge du mois d'avril au mois d'octobre) (Dahiya *et al*, 2007 ; Thomas *et al*, 2010). Cependant, il semblerait que l'Inde n'ait pas encore défini officiellement son nombre de DJR relatifs au besoin d'utilisation de l'air conditionné. Même si le National Building Code (NBC) indien (sur lequel nous reviendrons plus tard) a défini la température de 23°C comme unité de Degré-Jour Refroidissement standard (basé sur des standards internationaux), cette proposition doit encore être finalisée car celle-ci n'est pas parfaitement applicable à un pays tropical comme l'Inde. En effet, les attentes des populations sont différentes. A titre d'exemple, la Chine a arrêté son standard de « confort thermique » à une température de 26°C (CSE, 2016).

Par ailleurs, le U.S Energy Information Administration (EIA) a estimé que les villes indiennes posséderaient plus de Degré-Jour Refroidissement que les villes majeures aux Etats-Unis. Mais leurs calculs sont effectués selon le standard de confort américain qui se situe à 18°C, température au-dessus de laquelle on estime un besoin en air conditionné.

Country	Metropolitan area	Cooling Degree Days per year	Population, million (2005)
India	Chennai	3954	6.9
Thailand	Bangkok	3884	6.6
India	Mumbai	3386	18.2
India	Calcutta	3211	14.3
India	Delhi	2881	15
USA	Miami	2423	5.4
Brazil	Rio de Janeiro	2401	11.5
China	Hong Kong	2107	7
China	Shenzhen	2107	7.2
China	Guangzhou	2072	8.4
China	Shanghai	1129	14.5
Greece	Athens	1075	3.1
China	Beijing	840	10.7
USA	Los Angeles	837	12.3
Spain	Madrid	805	5.6
Argentina	Buenos Aires	512	12.6
Mexico	Mexico City	245	19.4

Tableau 1 : Degrés Jour Refroidissement par an par pays et métropoles. Source : Phadke *et al*, 2014

Enfin, d'autres données physiques comme les nuisances environnementales (la pollution, la chaleur, les bruits et les insectes,...) poussant à fermer les fenêtres ainsi que la mauvaise qualité des bâtiments (manque d'isolation thermique, absence de systèmes d'ombrage aux fenêtres,...) sont tous des facteurs pouvant augmenter l'envie d'utilisation de l'air conditionné (Pellegrino, 2013). Mais la tendance à cette croissance, et particulièrement dans un contexte comme celui du contexte indien, ne peut s'expliquer uniquement par un facteur « physique » lié à la variabilité climatique. Des facteurs dits socio-démographiques et socio-économiques doivent impérativement être analysés (Sailor, 2007).

Description du contexte social indien en mutation, rôle joué par la classe moyenne et dynamique de consommation de masse

○ L'urbanisation

Le taux d'urbanisation se définit selon le rapport entre la population urbaine à la population totale. Son évolution dépend de la croissance de plusieurs composantes, ou facteurs explicatifs : la reclassification administrative (changement de statut des villages en villes sur des critères administratifs ou démographiques), les migrations et l'accroissement démographique naturel (Querci *et al*, 2015). Le facteur le plus déterminant est sans doute le dynamisme démographique, l'accroissement naturel expliquant plus de 50% de la croissance urbaine pour les villes indiennes. De ce fait, pour que ce taux d'urbanisation augmente, il faut que la croissance de la population urbaine soit supérieure à la croissance rurale (Querci *et al*, 2015).

Le « concept d'urbanisation » est historiquement intégré à des transformations sociales ou économiques, la mobilité géographique, une fertilité plus faible ou l'espérance de vie, et se traduit

par d'importants changements des modes de vie et de l'environnement (UN, 2014). Le phénomène d'urbanisation est alors le résultat d'une migration des populations des zones rurales vers les zones urbaines mais également de création de nouveaux centres urbains (Kharas, 2010).

En 1950, 30% de la population mondiale vivait dans des zones urbaines, ce chiffre augmentant à 54% pour l'année 2014 et à 66% (parfois jusqu'à 70% selon certains scénarios) prévus pour 2050 (UN, 2014).

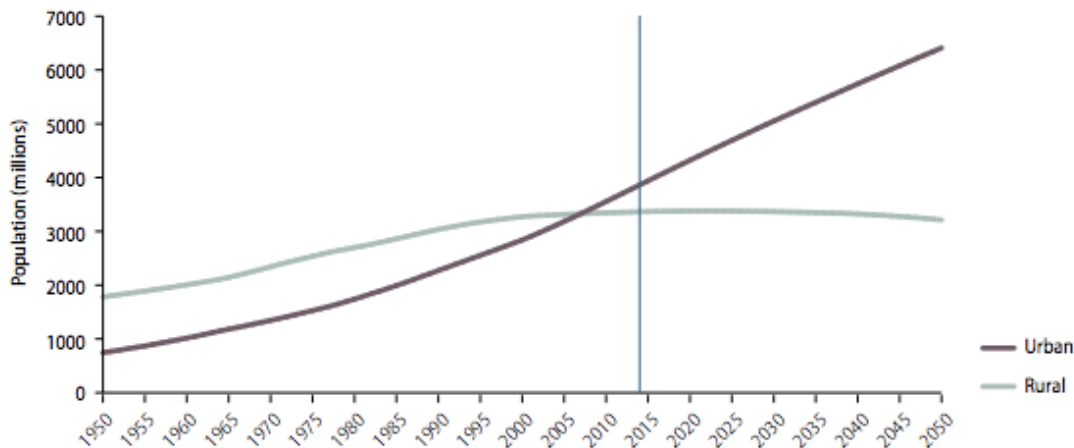


Figure 12.: Population urbaine et rurale du monde, 1950-2050. Source : United Nations, 2014

Néanmoins, ce phénomène d'urbanisation a été principalement étudié dans les pays développés, les agglomérations urbaines les plus nombreuses se trouvant dans ces régions. Les pays à hauts revenus ont de fait été rapidement urbanisés avec plus de 50% de la population de ces pays vivant déjà dans des zones urbaines en 1950. Ce qui, pour la même année, ne représente que 20% de la population pour les pays à moyens revenus. Les régions du monde les plus urbanisées sont alors l'Amérique du Nord, l'Amérique latine, les Caraïbes et l'Europe. Mais c'est à présent dans les pays de l'hémisphère sud que le taux d'urbanisation croît de manière considérable, entraînant un profond changement dans la taille et la distribution spatiale de la population urbaine mondiale (UN, 2014).

Une projection de la croissance de la population et de l'urbanisation ajoutera 2,5 milliards de personnes à la population urbaine d'ici 2050, avec pratiquement 90% de cette augmentation concentrés en Asie et en Afrique. Plus précisément, trois pays cumulés (Inde, Chine et Nigéria) représenteraient 37% de la croissance prévue de la population mondiale urbaine entre 2014 et 2050. Comprenant notamment l'Inde, qui devrait gonfler la population urbaine de 400 millions d'habitants d'ici là (UN, 2014). Pour 2050, certains scénarios prévoient que 52% de la population urbaine se concentrera en Asie et 21% en Afrique (UN, 2014).

Les centres urbains, en plus de subir des effets dits d'« îlot de chaleur » sont un des principaux consommateurs d'énergie dû à une concentration d'activités toujours plus grandissante et rendant les villes sources de pollution. Les consommations finales urbaines pèsent de plus en plus lourd

dans le bilan énergétique total, transformant la structure des consommations du pays. Le développement d'une économie d'énergie intensive découlant de cette urbanisation est donc un aspect déterminant des émissions dans les villes et doit donc être étudié dans le cadre de notre problématique énergétique (Dahiya *et al*, 2007).

A titre d'exemple, une étude sur le phénomène d'urbanisation en Chine (Allaire, 2007) démontre que le développement urbain aurait entraîné une forte croissance de la consommation énergétique dans certains secteurs. En effet, en 25 ans, la population chinoise urbaine a triplé (atteignant 520 millions de chinois urbains en 2003), le pouvoir d'achat des ménages urbains augmentant considérablement et faisant par conséquent exploser les consommations énergétiques. L'étude met aussi en relation les augmentations d'émissions de GES en fonction de l'intensité énergétique de deux secteurs en particulier : les transports et le « confort thermique », ce dernier représentant les deux tiers des consommations d'énergie des bâtiments, la climatisation étant devenue le premier poste de consommation d'électricité des ménages dans les grandes villes du sud du pays (Allaire, 2007). Shanghai consommerait deux fois plus d'électricité pendant l'été qu'au printemps ou en automne, imputable principalement à la recherche du bien-être thermique.

McNeil et Letschert (2008) affirment que seuls les ménages les plus riches des pays les plus pauvres peuvent s'accorder l'acquisition d'un équipement comme le climatiseur mais surtout que ces ménages sont pratiquement toujours urbains et électrifiés.

- Inde

Depuis toujours, l'Inde est considéré comme un pays majoritairement rural. En 2008 cela représentait 71% de la population indienne (l'équivalent d'environ 828 millions de personnes) (Remme *et al*, 2011) qui vivait dans les zones rurales. Mais ces cinquante dernières années, une urbanisation massive se manifeste. En 2011, l'Inde comptait pas moins de 377,1 millions d'urbains, dépassant ainsi la population urbaine des Etats-Unis ainsi que celle de l'Union européenne. On prédit que d'ici 2020, 40% de la population indienne vivra en ville, contre 28% en 2008 (Lall *et al*, 2008).

Pour la seule ville de Delhi, le taux d'urbanisation était de 47% entre 1991 et 2001, contre 21% pour la moyenne nationale, probablement causé par des migrations importantes depuis les états voisins, à la recherche d'emplois (Kadian *et al*, 2007). Notons que le taux de migration annuel se situe aux environs des 2,3%, restant relativement faible par rapport aux autres pays en voie de développement (Remme *et al*, 2011).

D'autre part, la grande particularité du pays est qu'il présente un grand nombre de villes dont plusieurs mégapoles. C'est le cas de Bombay, Delhi et Calcutta, les trois plus grandes métropoles dépassant les 10 millions d'habitants et permettant ainsi à l'Inde de s'imposer aujourd'hui comme un pays urbanisé. Certains scénarios projettent même que quatre à cinq nouvelles villes hébergeant 5 à 10 millions d'habitants se développeront dans les prochaines années. L'Inde posséderait alors un total de sept « mégacities » en 2030 (UN, 2014 ; Dewachter, 2015).

Cependant, cela reste préoccupant, l'industrie ayant contribué pour une grande part à la croissance économique du pays et à son urbanisation mais pas de manière uniforme: de grands et

modernes centres urbains comme Delhi ou Bombay côtoient des économies encore rurales et agraires (Remme *et al*, 2011).

De plus, une étude comparant les émissions de carbone par habitant dans les zones rurales et les zones urbaines a conclu qu'un habitant de zone rurale indienne émettait deux fois moins qu'un habitant de la zone urbaine (0.19 tCO₂équivalent/an contre 0,37 tCO₂eq/an) (Kumar & Viswanathan, 2013). Les causes de pollution atmosphérique pouvant être une conséquence à la fois du développement de moyens motorisés ainsi qu'à la multiplication des systèmes de climatisation, un parallèle pouvant être réalisé avec l'étude de 2007 sur la Chine (Allaire, 2007) qui affirmait que les deux secteurs représentant un défi majeur étaient la climatisation et les transports.

L'élan d'urbanisation et l'émergence de villes nouvelles (ou de reconstruction de celles déjà existantes) entraînent généralement la construction de nouvelles infrastructures (routes, réseaux de transports en commun,...) et de nouveaux bâtiments (Allaire, 2007). Dans le cas de l'Inde, le McKinsey Global Institute (MGI) prévoit qu'il faudra construire entre 700 et 900 millions de m² d'espaces résidentiels et commerciaux supplémentaires par an, pour pouvoir faire face à cette nouvelle urbanisation (Sankhe *et al*, 2010).

Cela démontre bien que le phénomène d'urbanisation est en fait intégralement lié aux trois piliers du développement durable que sont le pilier économique, social et environnemental (UN, 2014). Alors que les villes peuvent être considérées comme d'importants drivers de développement et de réduction de la pauvreté, l'expansion urbaine doit être encadrée afin d'éviter des dégradations environnementales ainsi que des productions et consommations non soutenables.

○ **Electrification et accessibilité des prix**

L'électrification des villes ainsi que l'accessibilité des coûts des équipements électroménagers et surtout frigorifiques sont fortement liées au phénomène d'urbanisation. De manière générale, il est peut être affirmé qu'un coût élevé de l'électricité est dissuasif dans l'acquisition d'un équipement d'air conditionné, la facture d'électricité pouvant s'alourdir de manière conséquente. A l'inverse, un coût plus faible incitera fortement les gens à consommer l'énergie nécessaire à leur confort (Rapson, 2011). Le prix de l'électricité aux Etats-Unis a diminué entre 1950 et 1960 (pour ensuite augmenter vers 1970). Le coût moindre des installations et des consommations de ces équipements, combiné avec une augmentation des revenus a donc entraîné une explosion du taux d'acquisition de climatiseurs pour cette même période (Biddle, 2008).

Un autre élément important est le coût des équipements de climatisation car le choix d'acquisition d'un climatiseur est souvent dicté par son prix. Ces dernières années, le prix de ces systèmes (et également des équipements électroniques en général comme les ordinateurs par exemple) ont diminué minimum de moitié, rendant plus accessibles ces biens autrefois perçus comme « luxueux » (Dahiya *et al*, 2007). Un rapport portant sur la climatisation dans certains pays du Maghreb fait la même constatation (Khalfallah *et al*, 2016). En 20 ans, ce produit semble s'être démocratisé et avec un prix divisé parfois par dix, les ventes ont explosées dans ces pays.

Il faut également préciser que dans certains cas, les appareils de climatisation sont souvent dotés d'une fonctionnalité chauffage, contribuant aussi à l'augmentation des ventes de ce type d'équipement (Grignon Massé, 2010).

Pour ce qui concerne l'Inde, le climatiseur semble devenir progressivement économiquement accessible aux classes moyennes (Pellegrino, 2013). Cependant, la société Voltas par exemple, représentant 18,3% du marché indien de climatiseurs (Palakshappa, 2013) affiche des prix de minimum 25 000 roupies indiennes (l'équivalent de 330 euros environ) pour un climatiseur de base. Sachant que le salaire le plus élevé de cette catégorie sociale atteint un maximum de 1 000 000 de roupies indiennes par an, soit l'équivalent de 13 000 euros (et donc 1100 euros par mois environ), ce produit reste encore une dépense relativement considérable.

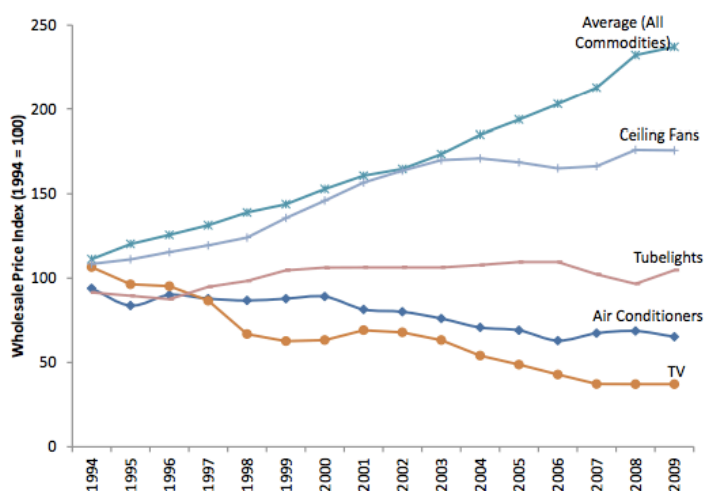


Figure 13 : Indices des prix de gros des principaux appareils électriques et moyenne de tous les produits (1994=100) Source : Phadke *et al*, 2014

○ Augmentation des revenus

Avant de développer la notion de « classe moyenne » émergente en Inde, notion extrêmement centrale dans la problématique présente, un autre facteur indissociable à celui-ci doit être abordé : celui de l'augmentation des revenus.

De nombreuses études semblent s'accorder sur le fait que les ménages possédant un plus haut revenu ont tendance à dépenser celui-ci dans des dispositifs dits de « luxe » (machine à laver, ordinateur,...) ; le climatiseur rentrant parfaitement dans cette catégorie (Dahiya *et al*, 2007).

Une récente étude de Davis et Gertler (2015) étudiant le Mexique s'attarde elle aussi sur l'étroite corrélation entre revenu et climatisation, mais plus comme une interaction entre les deux et non de manière individuelle. L'étude a analysé plus de 25 millions de foyers mexicains situés dans des régions aux climats différents (déterminées selon qu'elles soient au-dessus ou en-dessous de la

moyenne de DJR du pays) et a observé que l'usage de l'air conditionné au Mexique est aussi varié que son climat. Le taux de pénétration de la climatisation n'étant que de 10% dans les régions les plus froides, même pour les ménages possédant un haut revenu (de par exemple 30 000 USD minimum annuellement). Par contre, dans les régions chaudes, la corrélation est plus évidente, la pénétration augmentant doucement puis de manière considérable en fonction des revenus, avec un taux associé pouvant aller jusqu'à 80%.

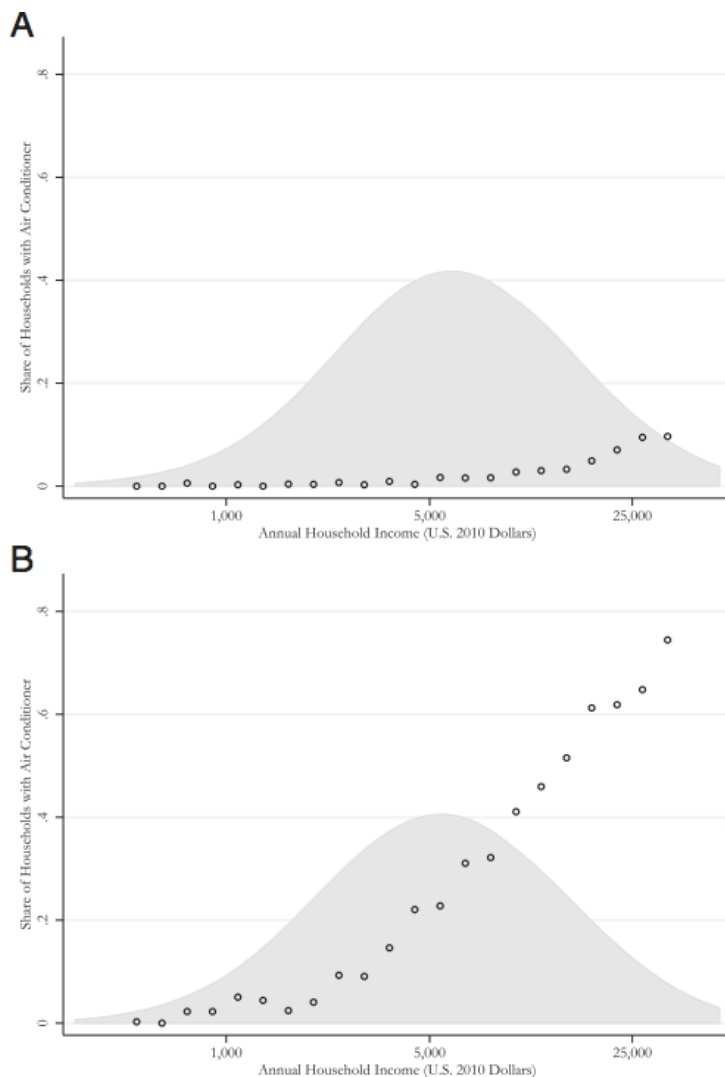


Figure 14: Revenu, climat et climatisation. (A) Pour les municipalités avec des DJR inférieurs à la moyenne. (B) Pour des municipalités avec des DJR supérieurs à la moyenne. Source : Davis & Gertler, 2015.

En résumé, ils sont arrivés au postulat que, par tranche de 1000 USD de revenu annuel, il y aurait une augmentation de 2,7% dans l'acquisition d'un climatiseur. Dès lors, si les revenus devaient augmenter de 2% chaque année, les projections se situeraient autour de 71% et 81% les ménages possédant un système d'air conditionné d'ici la fin du siècle, contrairement au taux de 2013, les situant à 13%. Enfin, le modèle de Davis et Gertler prévoit que près de 100% des ménages

posséderaient la climatisation dans les régions les plus chaudes du pays dans les prochaines décennies.

Concernant l'Inde, le graphique ci-dessous, bien que reprenant malheureusement les données pour les climatiseurs et les rafraichisseurs d'air comme un ensemble, permet d'observer deux choses : l'acquisition de tels équipements a augmenté significativement pour toutes les classes de revenus (doublant entre 2000 et 2010, surtout pour les deux catégories de revenus les plus élevées), et que la relation entre les revenus et l'acquisition d'un climatiseur ou refroidisseur d'air ne semble pas parfaitement linéaire (le taux d'acquisition pour les classes à hauts niveaux étant beaucoup plus élevé que pour les classes inférieures) (Phadke *et al*, 2014).

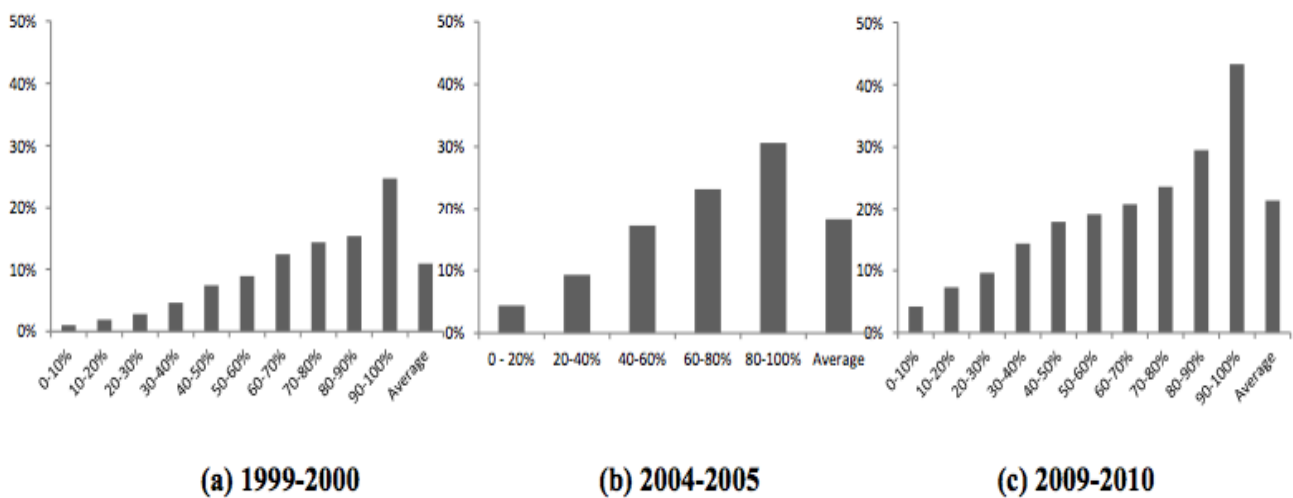


Figure 15 : Saturation des systèmes d'air conditionné et des refroidisseurs d'air dans les ménages urbains indien par tranche de revenus. Source : Phadke et al, 2014

Un second graphique illustrant la relation entre le revenu et la détention d'un climatiseur (et non plus de rafraichisseurs d'air) a été réalisé pour différents états indiens ainsi que par tranche de revenu pour les années 2004-2005. Cela permet d'observer que dans des états comme Delhi et Punjab, présentant des moyennes de températures et de revenus plus élevées, la pénétration de l'AC est aussi plus marquée.

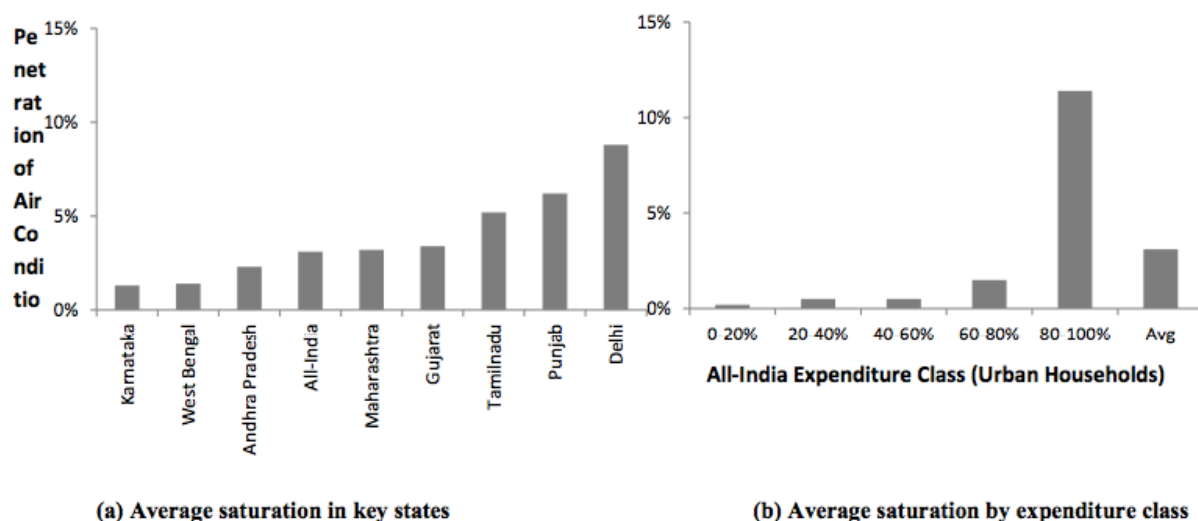


Figure 16: Saturation des climatiseurs dans les ménages urbains en 2004-05, dans certains états et dans toutes les tranches de revenus. Source : Phadke et al, 2014

○ Le développement d'une classe moyenne et d'une consommation de « luxe »

Comme démontré plus haut, le phénomène d'urbanisation est donc intimement lié au développement de nouveaux types de consommateurs sur le marché, friands de biens de « luxe » pouvant améliorer leur qualité de vie.

Afin de projeter cette affirmation dans le contexte social indien, il semble pertinent de reprendre la pyramide des revenus et des classes sociales réalisée par deux auteurs de l'Institut Global McKinsey ainsi que la manière dont celle-ci s'est transformée et restructurée (Beinhocker, Farrell, 2007).

On peut observer que la croissance économique a réduit le nombre d'indiens pauvres. Il semblerait en effet qu'environ 100 millions de personnes soient sorties de la pauvreté, la population dite « pauvre » passant de 93% à 54% depuis 1985. Ces « pauvres », appelés « the deprived », gagnant moins de 90 000 roupies indiennes par an (l'équivalent de 1 dollar par personne par jour) rejoindraient progressivement la classe des « aspirers ». Ces derniers gagnant entre 90 000 et 200 000 roupies par an. Cette catégorie passant, elle, de 41% à 36% de la population depuis les vingt dernières années, une partie importante de cette population migrant alors vers la classe moyenne.

La classe moyenne indienne peut être divisée en deux catégories : les « seekers » (percevant entre 200 000 et 500 000 roupies par an) et les « strivers » (entre 500 000 et 1 million de roupies par an). Leurs revenus se situant tout de même encore en-dessous du seuil de pauvreté de celui des Etats-Unis. La première classe s'étend des jeunes diplômés aux hauts fonctionnaires de gouvernement en ce compris les commerçants. Ils possèdent télévision, réfrigérateurs, téléphone mobile et parfois même un scooter. Ces « seekers » essayent de consacrer une partie de leur revenu à l'éducation de leurs enfants ou à leur retraite. Les « strivers » eux, sont les plus hauts placés de la

classe moyenne indienne. Ils représentent les fonctionnaires, les managers et les riches fermiers. Leurs dépenses se tournent plutôt vers la mode, les dernières voitures et les gadgets électroniques. Ils s’octroient régulièrement des vacances (même si passées principalement en Inde), et sont souvent détenteurs d’un air conditionné.

Ensuite, il y a les « Global Indians » au fort pouvoir d’achat, gagnant minimum 1 million de roupies par an (l’équivalent de 13 000 euros). Dirigeants d’entreprise, politiques et propriétaires de terres agricoles, leurs goûts s’apparentent à ceux des jeunes occidentaux (voitures de luxe, marques de créateurs, vacances à l’étranger,...). Aujourd’hui, ils représentent 1,2 million de ménages comptant pour 2 milliards de roupies de pouvoir d’achat. Mais d’ici 2025, ces « Global Indians » pourraient atteindre les 9,5 millions d’Indiens avec un pouvoir d’achat allant jusqu’à 14,1 milliards de roupies, c’est à dire 20% de la consommation totale indienne !

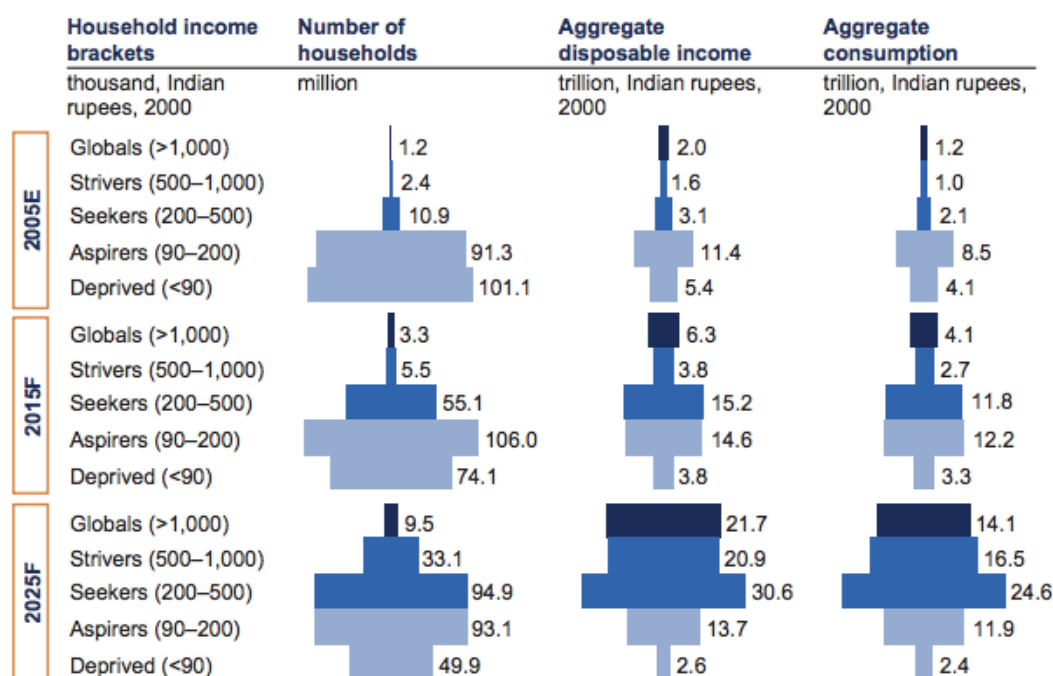


Figure 17: Changement dans la pyramide des revenus en Inde selon les différentes catégories sociales 2005- 2025. Source : Ablett *et al*, 2007.

Ce changement structurel dans la distribution des revenus a pour conséquence une évolution notable dans les pratiques de consommation depuis les vingt dernières années. Les dépenses pour les biens de première nécessité comme la nourriture ou les vêtements sont petit à petit remplacées par des achats d’équipements ménagers, les restaurants, ou autre. L’utilisation de cartes de crédit se généralise, les objets, les vêtements et les bijoux « fashion » étant de plus en plus convoités (Beinhocker *et al*, 2007 ; Kharas, 2010 ; Dewachter, 2015).

Néanmoins, cette notion de « classe moyenne » étant de plus en plus floue en fonction des pays et des époques, la définition « quantitative » basée sur les revenus reste malgré tout privilégiée permettant de quantifier de manière objective les classes sociales (Varma, 2009 ; Dewachter, 2015).

Au niveau mondial, l'OCDE affirme qu'en 2009, la classe moyenne mondiale représentait 1,8 milliards d'individus, repartis entre plusieurs grandes puissances que sont l'Amérique du Nord (338 millions), l'Europe (664 millions) et la Chine (525 millions) (Kharas, 2010 ; Pezzini, 2012). En 2020, ce nombre sera projeté pour atteindre les 3,2 milliards puis les 4,9 milliards d'ici 2030 (Reuters, 2012). Cette croissance signifierait alors que la classe moyenne mondiale regrouperait plus de 50% de la population totale (Goldmann Sachs, 2008) pouvant même aller jusqu'à dépasser en nombre d'individus la classe « pauvre » d'ici 2022.

	2009		2020		2030	
North America	338	18%	333	10%	322	7%
Europe	664	36%	703	22%	680	14%
Central and South America	181	10%	251	8%	313	6%
Asia-Pacific	525	28%	1,740	54%	3,228	66%
Sub-Saharan Africa	32	2%	57	2%	107	2%
Middle East and North Africa	105	6%	165	5%	234	5%
World	1,845	100%	3,249	100%	4,884	100%

Figure 18 : La classe moyenne mondiale: taille et distribution (en millions de personnes). Source : Kharas & Gertz, 2010.

Plus précisément, l'évolution historique de la distribution de ces classes sociales se présente comme suit: dans les pays émergents, 80% de la population faisaient partie des classes pauvres ou à bas-revenus pour l'année 2000 (Salama, 2013). Huit ans plus tard, ce pourcentage passait déjà à 60% de la population et certains scénarios avancent que d'ici 2020, ce ne serait plus que 40% de la population des pays émergents qui se retrouveraient dans ces catégories. Pour des pays comme l'Inde ou la Chine, cette proportion baisserait à 30% d'ici 2030 (Pezzini, 2012). Ce déplacement du poids des classes moyennes dans les pays émergents et surtout des pays du BRICS⁹ (dû à une évolution en nombre d'individus stimulée par la croissance économique) s'est accompagné d'un changement dans la distribution des richesses mondiales, avec une Chine et une Inde bien parties pour devenir les principaux moteurs du consumérisme mondial (Pezzini, 2012).

⁹ BRICS: Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud.

Cette nouvelle génération de consommateurs possède des goûts et des comportements de consommation fortement semblables à ceux des occidentaux. Ces groupes choisissent ce qu'ils veulent consommer. L'apparition de cette nouvelle catégorie de consommateurs friands de loisirs, tourisme, bien-être,... a permis à certains secteurs de se développer fortement, comme le commerce de détail, le secteur de l'automobile ou encore les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). Mais c'est essentiellement le secteur de l'électroménager qui s'est révolutionné (Beinhocker, Farrell, 2007).

Historiquement, la classe moyenne indienne est apparue à l'indépendance du pays en 1947 mais s'est amplifiée grâce à l'ouverture économique et aux réformes des années 1990 (économie tournée vers le commerce international,...), ainsi qu'à une démographie favorable et une population très jeune (âge moyen de 26 ans), réformant alors le style de vie des familles indiennes. D'après le National Council of Applied Economic Research (NCAER, 2005), en 2001-2002, la classe moyenne indienne représentait 10,7 millions de ménages, l'équivalent de 5,7% de la population totale. En 2007, ce chiffre passait à 50 millions de personnes et pour 2025, les projections l'augmentent à 583 millions, quasiment 41% de la population totale indienne (McKinsey Global Institute, 2007 ; Pellegrino, 2013).

La part des revenus consacrée à la consommation de biens de première nécessité (nourriture, habillement,...) diminuerait de 48% en 2005 à 30% pour 2010. Les ménages indiens pouvant se permettre une consommation discrétionnaire (au delà du seuil de la pure nécessité) passeront alors de huit millions, à 94 millions en 2025 (Pellegrino, 2013).

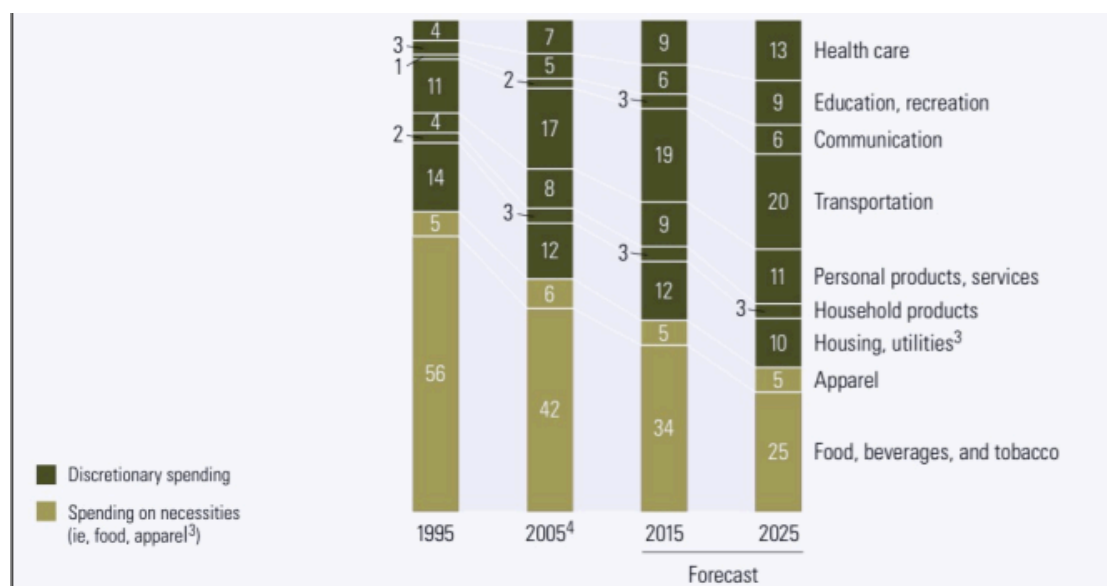


Figure 19 : Répartition de la consommation moyenne annuelle des ménages indiens (En %). Evolution de 1995 à 2025. Source : Beinhocker *et al*, 2007.

En conclusion, en 2030, l'Inde pourrait représenter le marché de consommation le plus important du globe, avec des habitudes de consommation totalement différentes de ce que la société indienne traditionnelle a connu jusqu'ici (Kharas, 2010).

Mais, l'économie indienne est également une des économies les plus complexes. Il faut préciser qu'un bon nombre de « nouveaux consommateurs » indiens ont encore des revenus modestes. Le marché de l'Inde devra donc plutôt compter sur son volume de consommation que sur ses dépenses par habitant (Beinhocker & Farell, 2007).

Les pratiques sociales dans la consommation énergétique

Bien que les différents facteurs incitatifs aient été expliqués, il semble que dans le cas de l'Inde, les facteurs d'ordre social soient les plus déterminants. De ce fait, les habitudes d'usage d'un tel bien de « luxe » doivent être étudiées dans le contexte de la sociologie de l'énergie afin de bien en comprendre les tenants et les aboutissants.

- Le « confort thermique » : qu'est-ce que c'est?

Le « confort thermique » se définit comme étant un niveau de satisfaction exprimé par un individu par rapport à l'ambiance thermique du milieu environnant dans lequel il se trouve. Sa sensibilité personnelle (âge, sexe, état psychologique,...), l'habillement, le métabolisme ou encore les habitudes culturelles, ainsi que des paramètres liés aux conditions climatiques de son environnement immédiat sont tous des facteurs influençant cette perception (Park, 2013).

Pour exemple, on retrouve principalement cette notion de « confort thermique » dans le secteur de l'automobile ou des transports, les systèmes d'air conditionné permettant une meilleure visibilité par temps froid et humide ainsi qu'un maintien de la vigilance du conducteur, plus un confort de conduite et une sensation de bien-être (Guignard, Timmermans, 2005).

La qualité de l'air intérieur aurait aussi une influence notable sur la productivité des personnes sur leur lieu de travail. L'installation de systèmes de climatisation augmenterait alors l'efficacité, les capacités et les effets de confort (IFF, 2015 ; Aebischer, 2007). Un professeur à Tokyo affirme même que pour chaque degré supérieur à une température de 25°C, il en résulte une diminution de 2% de la productivité. Sur une journée, cela représenterait l'équivalent de 30 minutes de travail en moins (Rosenthal, 2012).

Cette notion de « confort thermique » peut être analysée étant comme l'évolution d'une construction sociale et technique. Celle-ci a suivi l'évolution des technologies dans la société en étant d'abord définie de manière rationnelle par les sciences de la construction et de l'ingénierie, et par des paramètres répondant à des données physiologiques. Par la suite, ce sont les architectes et les urbanistes qui s'y sont intéressés. Les sciences médicales ont suivi, afin de mettre en lien le confort et la santé des personnes âgées et des populations fragiles (Subrémon, 2011). Alors que l'aspect culturel et social de la notion de « confort thermique » est encore peu développé, de nombreux auteurs penchent aujourd'hui sur la « sociologie de l'énergie », soucieux de donner une

place centrale aux pratiques sociales dans les consommations énergétiques de manière générale (Brisepierre, 2013 ; Subrémon, 2011).

Ces recherches portent alors majoritairement sur la question du confort, du climat intérieur et de la climatisation artificielle de l'espace habité. En effet, les pratiques de chauffage ou de climatisation donneraient un sens supplémentaire à celui de la seule volonté de satisfaire une sensation physique (Subrémon, 2011). Le « confort thermique » ne doit alors pas être réduit simplement à des paramètres physiologiques, psychologiques et thermiques mais être observé dans son rapport avec des facteurs culturels, historiques et sociétaux (Shove 2005 ; Subrémon, 2011). Un des postulats de départ serait alors que les comportements et les pratiques d'usage des habitants influent, ou pas, sur l'acquisition d'un climatiseur et constituent alors un aspect fondamental à considérer lorsqu'on analyse ce genre de problématique énergétique.

- Représentation du confort thermique dans la société indienne

Lorsque l'on étudie un pays en développement comme l'Inde, il est primordial de donner une place prépondérante à l'analyse sociale et anthropologique des usages de l'énergie dans l'habitat ainsi qu'à la perception des statuts sociaux. Et ce, en parallèle avec le phénomène croissant d'urbanisation, de modernisation des espaces domestiques et, plus généralement, l'évolution des modes de vie (Subrémon, 2011).

Une étude réalisée à Calcutta s'interroge sur la réelle nécessité de la climatisation et tente de dépasser l'idée selon laquelle la climatisation serait une conséquence automatique de l'avancée économique des pays en développement ; cette logique étant ancrée dans une vision centrée sur les modes de vie occidentaux (Pellegrino, 2013). Celle-ci met en opposition les notions de « besoins absolus » et de « besoins relatifs », définis par Keynes en 1990 de la manière suivante : « les besoins absolus sont ceux que nous ressentons quelle que soit la situation d'autrui, et les besoins relatifs ceux dont la satisfaction nous fait planer au-dessus de nos semblables et nous donne un sentiment de supériorité vis-à-vis d'eux » (Pellegrino, 2013, paragraphe 8).

Pour rappel, les maisons traditionnelles indiennes du 18^{ème} siècle et 19^{ème} siècle étaient très bien conçues d'un point de vue architectural, les protégeant des excès climatiques élevés. Cela se traduisait par une bonne isolation, une certaine épaisseur des murs, une attention particulière portée au choix des matériaux de construction, du double vitrage, des protections contre les radiations solaires, etc. La question se pose alors plutôt dans les constructions les plus récentes, de faible qualité à bien des égards. Sachant que l'Inde de 2030 doit encore se construire pour 80%, on peut facilement imaginer ce que cela peut représenter (Gupta *et al*, 2009).

La notion de « confort thermique » relève d'une autre problématique : celle de la tentative d'uniformisation des pratiques domestiques et surtout de la définition même des normes de confort. Les codes techniques et les standards comme ceux dictés par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE) tentent de généraliser en qualités universelles, le concept de confort humain et ses paramètres (Chappells & Shove, 2005). C'est notamment ce que met en avant l'article « Debating Futur of confort » de 2005 (Chappells & Shove, 2005), s'interrogeant sur la possible existence de méthodes de la science du bâtiment, tentant de donner à la température optimale une notion universelle et de généraliser donc l'acquisition d'un équipement comme les climatiseurs. Le confort serait alors devenu un bien de

grande consommation, que l'on peut standardiser et diffuser « avec en toile de fond l'ambition de satisfaire des besoins précisément identifiés » (Maresca *et al*, 2009, p.70)

En Inde, deux lois encadrent la consommation énergétique et le « confort thermique » à l'intérieur des bâtiments (résidentiels, tertiaires ou commerciaux) ayant pour objectif de transcrire des lignes directrices pour réguler la température intérieure : le National Building Code (NBC) et l'Energy Conservation Building Code (ECBC) (Thomas *et al*, 2010 ; Pellegrino, 2012). Ces « directives » préconisent deux intervalles de températures pour les bâtiments conditionnés et jugés aptes à assurer un état de « confort thermique » pour les usagers : de 23°C à 26°C (avec 50%-60% de taux d'humidité relative) pour l'été et de 21°C à 23°C (et pas moins de 40% de taux d'humidité relative) pour l'hiver (Pellegrino *et al*, 2016). La faiblesse de ces règles réside dans le fait qu'elles sont basées sur des données américaines imposées par l'ASHRAE sans s'adapter aux climats indiens et sans considérer que les perceptions de confort ne sont pas généralisables et universelles. Ensuite elles ne font aucune distinction dans le type d'utilisation des bâtiments (que ce soit les classes d'école, les bureaux, les restaurants,...) (Pellegrino *et al*, 2016).

L'étude de terrain réalisée à Calcutta s'interroge sur les conséquences de la généralisation de la définition de cette notion sur les pratiques d'usage d'un équipement comme le climatiseur. Pour cela, la différence entre les températures de « confort thermique » ressenties par l'échantillon (en supposant que l'utilisation d'un climatiseur est une nécessité d'ordre uniquement physique) et la température réelle des espaces publics et privés (et leur consommation énergétique) sera étudiée en prenant comme base et surtout en les comparant, les codes ASHRAE ainsi que les Codes indiens. Le but ici n'est pas de s'appesantir sur la méthodologie ni le déroulement des enquêtes menées, mais bien de s'interroger sur les résultats, qui sont les suivants : « les températures préférées par l'échantillon, même si elles sont plus basses que la température neutre calculée précédemment, reste bien au-dessus de l'intervalle de confort indiqué par les Codes indiens » (Pellegrino, 2013, paragraphe 22). La neutralité thermique (perception subjective immédiate du confort thermique) s'est située entre 29,4°C et 32,5°C par rapport à un intervalle de 23°C à 26°C préconisé par les Codes indiens. De plus, la préférence thermique des enquêtés (reflétant les désirs de changements thermiques) est restée située à 27,8°C, se positionnant toujours en-dessous de l'intervalle de confort défini par le NBC ou l'ECBC.

En conclusion, cette étude a pu démontrer que les habitants de Calcutta peuvent, en réalité, s'adapter à des températures plus élevées que celles dictées par les codes uniformisés sur les standards nord-américains qui donnent, eux, l'impulsion d'une nécessité de rafraîchissement de l'air. Cela confirme également que la transformation des systèmes énergétiques et donc la croissance de l'utilisation d'un équipement tel que le climatiseur, au-delà de conditions globales comme les ressources énergétiques, les changements climatiques ou la croissance économique, doit se focaliser avant tout sur les enjeux locaux (Zain *et al*, 2007).

Un aspect important réside dans la différence de sensation de « confort thermique » entre les zones rurales et les zones urbaines. Les résultats d'une étude comparative dans certaines régions de Chine montrent que la température dite « neutre » se situerait à 14°C pour les zones urbaines et à 11,5°C pour les zones rurales. La population rurale semble alors avoir une tolérance plus élevée que la population urbaine (Han *et al*, 2009). Cela peut s'expliquer par une meilleure acclimatation physiologique des gens vivant dans les campagnes ainsi que d'attentes thermiques

plus basses. Ensuite, les styles de vie et les statuts économiques ou individuels sont différents, l'air conditionné étant moins fréquent en zone rurale qu'en zone urbaine (ainsi que pour les plus pauvres d'après Pellegrino *et al.*, 2012) (Han *et al.*, 2009). Enfin, l'influence du passé serait également déterminante, les personnes ayant l'expérience de climat chaud et humide depuis des décennies auraient une tolérance plus élevée à des hautes températures que celles qui se trouvent dans des régions plus froides (Pellegrino *et al.*, 2012).

- La climatisation comme reflet d'une position sociale

Au regard des arguments précédents, il semble pertinent de s'interroger sur le réel processus se cachant derrière cette dynamique d'utilisation croissante de l'air conditionné, et d'observer à quel point la climatisation reflète un véritable mode de vie et de civilisation (Ackermann, 2002). L'appartenance à un statut social identifiable s'affirme à travers la possession d'un objet et son mode d'utilisation (l'utilisation « sans soucis » de l'énergie) (Pellegrino, 2013), l'acquisition d'un tel équipement étant un « moyen subtil auquel l'individu a recours pour se démarquer socialement » (Subrémon, 2011, p. 21).

Le niveau de consommation énergétique est devenu un réel indicateur des statuts sociaux en Inde, la possession d'un climatiseur étant synonyme d'acquisition d'un bien de luxe. En plus d'être visible à l'extérieur, un équipement tel qu'un climatiseur permet d'accueillir dignement les invités. La « sociologie de l'énergie » démontre que les moments de sociabilité sont des temps forts dans la consommation d'énergie domestique. L'analyse des pratiques énergétiques dans les différentes pièces d'un ménage confirme que le « séjour » (ou le salon) est un lieu accueillant dans lequel on reçoit la famille et les amis et donc un espace de vie où se déroulent des relations sociales importantes (Subrémon, 2011 ; Brisepierre, 2013). L'étude effectuée à Calcutta complète ces conclusions, cinq ménages sur six interrogés déclarant que l'utilisation d'un climatiseur « dépendait d'un plaisir personnel procuré par le fait de se savoir capable de payer ce type de confort » ainsi que de pouvoir recevoir des visites et offrir un espace frais et climatisé à leurs invités (Pellegrino, 2013, paragraphe 34). Contrairement à une ville comme Singapour où le climatiseur n'est pas considéré comme un bien de luxe mais bien comme un équipement quotidien, commun, banal, naturel et dont les Singapouriens ne peuvent se passer (et représentant un tiers des dépenses d'énergie de la ville) (Hitchings, 2007 & 2008). En effet, aujourd'hui l'air conditionné n'est plus seulement utilisé dans les espaces privés et fermés mais également à l'extérieur, reportant les normes de confort intérieur sur l'extérieur. A titre de comparaison, cela peut s'apparenter à une pratique que l'on connaît bien dans nos pays : les chaufferettes extérieures dont on dispose pour pouvoir profiter des terrasses même lorsque les températures extérieures ne le permettent pas.

Chapitre IV : Les impacts de la climatisation

L'utilisation d'équipements contrôlant le confort thermique fait partie des normes de vie depuis de nombreuses années dans les pays dits industrialisés comme les Etats-Unis, représentant des impacts économiques et surtout environnementaux déjà importants. Cependant, c'est l'expansion constante et rapide de la climatisation dans les pays en développement qui se révèle problématique pour les décennies futures.

En effet, après avoir exposé les différentes évolutions qu'a connu le développement de l'air conditionné dans certaines parties du globe ainsi que les facteurs incitatifs à ce genre de pratiques (essentiellement sociaux dans un cas comme l'Inde), les impacts vont être développés ici, qu'ils soient d'ordre économique, sanitaire mais surtout environnemental. Les premiers seront rapidement passés en revue pour le secteur du froid, pour ensuite se concentrer principalement sur la problématique environnementale que représente la croissance de la climatisation de manière générale.

Les impacts économiques

La climatisation, ainsi que le secteur du froid, présentent des impacts économiques importants à l'échelle internationale. La production du froid semble être indispensable dans toutes les régions du monde, que ce soit pour des raisons sanitaires (notamment l'industrie de l'agro-alimentaire), pour un meilleur « confort thermique » ou une qualité de vie supérieure, représentant un enjeu économique non négligeable selon les acteurs concernés.

Une note publiée en 2015 par l'Institut International du froid (IFF) estime que pour cette même année, le nombre total de systèmes de froid, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur en fonctionnement dans le monde s'élevait à 3 milliards, les réfrigérateurs domestiques représentant 1,5 milliard (IFF, 2015). Les ventes totales rien que pour les climatiseurs mobiles pour 2015 sont estimées à 2 millions d'unités, représentant une augmentation de 7% par rapport à 2014 et une valeur de 524 millions de dollars (BSRIA, 2016). Le secteur du froid, pouvant aujourd'hui être considéré comme un réel business en expansion constante, représente des recettes annuelles se situant aux alentours des 300 milliards d'USD. Le nombre d'emplois lié à ce secteur s'élève à 12 millions de personnes au niveau mondial et continue de progresser (IFF, 2015). Enfin, l'industrie Daikin ¹⁰estimait à 9 milliards de dollars (USD) le marché du climatiseur pour 2010 et à 16 milliards USD pour l'année 2015, démontrant le business croissant de cet équipement.

Les impacts sur la sécurité alimentaire

Le froid est devenu aujourd'hui une composante essentielle dans le secteur de la distribution, celle-ci offrant une meilleure conservation et préservation des qualités sanitaires et organoleptiques des denrées alimentaires (IFF, 2015). Avec le phénomène croissant d'urbanisation que connaissent certains pays en développement, le nombre de personnes dont l'alimentation dépend du bon fonctionnement de la chaîne du froid augmente sans cesse.

¹⁰ Daikin Industries. *Market Potential*. En ligne: http://www.daikin.com/about/why_daikin/rise/

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime en moyenne à 30% l'ensemble des denrées alimentaires perdues car mal conservées. Dans les pays tropicaux, ce taux pourrait atteindre 50% (GIZ, 2012). Les pertes alimentaires mais aussi économiques sont alors considérables. Des systèmes plus efficaces, moins obsolètes et se rapprochant des chaînes du froid des pays dits « développés » pourraient représenter un impact positif sur les revenus de populations locales de ces pays et même nourrir jusqu'à un milliard de personnes supplémentaires¹¹ (IFF, 2003).

Les impacts sur la santé

L'IFF affirme que pour un pays comme les Etats-Unis, le nombre de décès ayant lieu pendant les périodes de fortes chaleurs aurait chuté de 80% depuis 1950 et ce, suite à une pénétration croissante des équipements de climatisation (IFF, 2003). Au niveau européen, la canicule d'août 2003 a permis de reposer la question des besoins en climatisation indispensables à la santé. Cette forte vague de chaleur ayant eu un impact important sur le taux de mortalité ainsi que sur la hausse des admissions dans les hôpitaux (Aebischer *et al*, 2007).

Un autre aspect primordial liant le besoin de climatisation au secteur de la santé demeure le stockage et la conservation des produits pharmaceutiques tels que les vaccins, devant être impérativement conservés dans un milieu froid et hermétique. Ce point semble être le plus problématique dans les pays en développement, ceux-ci ne possédant pas suffisamment de lieux d'entreposage certifiés et contrôlés. Enfin, le secteur du froid a permis bon nombre de progrès dans le milieu médical, notamment le développement de nouveaux traitements de plus en plus poussés comme la cryochirurgie ou la cryothérapie.

Le froid, et la climatisation en particulier, peuvent malgré tout également présenter des effets néfastes sur la santé, ceux-ci pouvant être regroupés en différentes catégories : les pathologies liées à la bio-contamination des systèmes d'aération, les risques d'exposition aux liquides réfrigérants mais également les chocs thermiques (Guignard, Timmermans, 2005). La première pathologie suppose que la qualité de l'air peut être contaminée par des micro-organismes de type moisissures (champignons par exemple) ou actinomycètes pouvant déclencher des réactions allergiques ou des maladies respiratoires comme une pneumonie hypersensible, de l'asthme, ... Pour ce qui est de l'exposition aux fluides frigorigènes, l'ammoniac en est un parfaite exemple, celui-ci étant un gaz incolore qui peut provoquer une odeur piquante et une irritation pulmonaire ou oculaire si on y est trop exposé. Les hydrocarbures peuvent provoquer une asphyxie par anoxie, se traduisant par un air ne contenant plus assez d'oxygène pour être respirable (Lebreton, 2005). Afin de limiter les chocs thermiques, certains pays comme la Tunisie, via une campagne de sensibilisation, préconisent une température minimale des bâtiments de 26°C, censée assurer un certain confort et réduire un trop grand écart de température (Khalfallah *et al*, 2016).

Mais toutefois, il existe peu d'études approfondies et certifiées se penchant réellement sur une interaction possible entre les différents effets sanitaires et les systèmes de climatisation, les propos précédents sont donc à traiter avec prudence.

¹¹ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/404>

Les impacts sur l'environnement

D'un point de vue purement environnemental, le secteur du froid peut s'apparenter aux problématiques suivantes (GIZ, 2012) :

- les déperditions d'air froid, les questions d'isolation et d'efficacité du processus de refroidissement et du transfert thermique ;
- les impacts des émissions des réfrigérants ;
- l'utilisation des énergies fossiles dans l'approvisionnement électrique ;
- la qualité de l'entretien, de l'installation et de la réparation des équipements et des installations.

En conséquence, les systèmes d'air conditionné ont de réels impacts sur l'environnement : un impact direct dû au relâchement de réfrigérants, et des impacts indirects causés par la combustion de l'énergie fossile ainsi que des émissions liées à la production, le transport,... autrement dit le cycle de vie du produit de manière générale (Palakshappa, 2013 ; Chaturvedi, Sharma, 2016).

L'analyse ci-présente se penchera essentiellement sur deux problématiques principales liées à la climatisation : le rejet de certains gaz frigorigènes dans l'atmosphère, représentant 20% des impacts environnementaux de la climatisation, et la consommation énergétique et les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) générées lors de la production d'énergie nécessaire au fonctionnement des appareils de conditionnement d'air, représentant 80% des impacts. Ce dernier est actuellement le plus problématique. La récupération des fluides en fin de vie est, quant à elle, de plus en plus contrôlée, et la qualité des installations améliorée, limitant les fuites de ces gaz (Chaturvedi, Sharma, 2016).

○ Les fluides frigorigènes

La définition reprise dans le rapport du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) en 2014 (UNEP, 2014, p. 19) est la suivante : « les fluides frigorigènes sont des substances ou des mélanges de substances utilisés dans les circuits de systèmes frigorifiques (climatisation, congélateur, réfrigérateurs, etc.) qui possèdent des propriétés thermodynamiques (passage en phase liquide et en phase gazeuse en fonction de la température et de la pression) permettant de transférer l'énergie calorifique (production de froid) ». Ainsi, chaque fluide, qu'il soit sous forme d'une substance pure ou d'un mélange sera identifié selon une désignation numérique et la lettre « R » (utilisée pour « réfrigérant »). A titre d'exemple, l'ammoniac est connu sous l'appellation « R-717 ».

Les fluides frigorigènes font partie de ce qu'on appelle les « Substances Appauvrissant la Couche d'Ozone » (SACO), elles-mêmes se situant dans la catégorie des halocarbures, définis comme des composés halogénés synthétiques (c'est à dire qu'ils sont présents dans la nature sous forme de sels le plus souvent) tels que le chlore, le brome, l'iode ou le fluor. Les SACO sont des substances relativement stables, se déplaçant facilement vers la stratosphère et pouvant l'impacter de manière considérable (Lebreton, 2015). C'est le cas des éléments de chlore ou de brome qui participent à

des réactions photochimiques avec l'ozone stratosphérique, rendant difficile la régénération de celle-ci. Sans oublier la capacité de rétention de la chaleur des SACO qui est extrêmement élevée, l'émission d'une tonne de SACO (selon son type) pouvant être égale à l'émission de plus de mille tonnes du gaz à effet de serre le plus notable, le dioxyde de carbone (CO₂) (CSE, 2014). Ce n'est donc pas uniquement la température du globe qui se voit modifiée, mais également les systèmes de courants marins, la pluviométrie de certaines régions et d'autres phénomènes de régulation naturelle importants.

Les principaux fluides frigorigènes se distinguent en différentes catégories, dépendant de leurs propriétés physico-chimiques (Lebreton, 2005) :

- les substances **inorganiques pures** : H₂O, CO₂ ; utilisées au début du 20^{ème} siècle puis abandonnées progressivement car considérées comme dangereuses ;
- les **hydrocarbures** : saturés ou présentant une double liaison : le butane ou l'isobutane ;
- les **hydrocarbures halogénés** : les CFC, HFC ou HCFC ;
- les autres produits.

Un fluide frigorigène idéal doit présenter de nombreuses caractéristiques dont les suivantes :

- grande chaleur latente de vaporisation ;
- point d'ébullition assez bas ;
- faible taux de compression ;
- composition chimique stable, pas d'action sur les métaux ;
- non inflammable, non explosif ;
- sans effet sur la santé, ni sur les denrées périssables, ni sur l'environnement (nocif pour la couche d'ozone et/ou pour l'effet de serre) ;
- facile à détecter ;
- d'un coût peu élevé ;
- facile à produire et disponible.

Le choix d'utilisation de tel ou tel fluide se fait en fonction de leurs caractéristiques thermodynamiques mais également selon leur impact plus ou moins nocif sur l'environnement. Pour cela, trois indices d'impact leur sont associés et attribués (UNEP, 2014, p. 24 ; Benhadid Bib, Benzaoui, 2012) :

- le **Potentiel d'Appauvrissement de la couche d'Ozone** (PAO) qui mesure la capacité relative d'une Substance Appauvrissant la Couche d'Ozone (SACO) comparativement à un composé de référence, généralement le R-11 (trichlorofluorométhane) ou le R-12 qui possèdent un PAO égal à 1. Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone varie généralement entre 0 et 1 et classe donc les composés chimiques selon leur nocivité par rapport à la couche d'ozone.
- le **Potentiel de Réchauffement Global** (PRG) représente le potentiel à provoquer directement l'effet de serre. Selon l'IPCC (IPCC, 2007), « cet indice est fondé sur les propriétés radiatives d'un mélange homogène de gaz à effet de serre, qui sert à mesurer le forçage radiatif d'une unité de masse d'un tel mélange dans l'atmosphère actuelle intégré

pour un horizon temporel, donné par rapport à celui du CO₂. Le PRG représente l'effet combiné des temps de séjour différents de ces gaz dans l'atmosphère et de leur pouvoir relatif d'absorption du rayonnement infrarouge thermique. Le Protocole de Kyoto de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) est basé sur des PRG à partir d'émissions d'impulsions sur une durée de 100 ans ».

De manière plus simplifiée, le PRG donne la quantité de CO₂ qui aurait un effet équivalent sur l'effet de serre à l'émission d'un kilo de fluide (à l'horizon 100 ans).

C'est un indicateur fortement utilisé pour évaluer la performance des systèmes d'air conditionné (Zhao *et al*, 2015).

A titre d'exemple, 1 kilo d'un fluide frigorigène ayant un PRG de 150 ans aura le même effet que 150 kilos de CO₂. En comparaison, la molécule de référence qu'est le dioxyde de carbone possède un PRG de 1, et donc le plus petit PRG, alors qu'il a le plus contribué au réchauffement climatique depuis 1750, en raison du volume important de ses émissions (MEEM, 2017).

En conclusion, plus cet indice est élevé, plus le composé est néfaste.

- **L'Impact de réchauffement total équivalent** ou Total Equivalent Warming Impact (TEWI) caractérise l'impact global d'un équipement frigorifique sur l'effet de serre et durant sa vie opérationnelle. Cet indice comprend l'impact direct par l'émission du fluide et également l'impact indirect de la consommation d'électricité et donc des émissions de CO₂ nécessaires à la production de l'énergie faisant fonctionner l'installation.

Le TEWI s'exprime en Kg de CO₂ et suit l'équation suivante :

$$TEWI = (GWP \times L \times n) + (GWP \times m [1-C]) + n \times E \times \beta$$

Où :

- GWP : Global Warming Potential
- L : émissions annuelles de fluide en kg
- n : durée de vie du système en années
- m : charge en fluide frigorigène en kg
- C : facteur de récupération/recyclage compris entre 0 et 1
- E : consommation annuelle d'énergie en kWh
- β : émission de CO₂ en kg/kWh.

Les émissions directes de ces fluides frigorigènes sur l'environnement dépendent alors principalement du PRG du fluide, de sa charge, du taux de fuite pendant sa durée de vie ainsi que du taux de récupération du fluide en fin de vie (Grignon- Massé, 2010). Même si les techniques de récupération du fluide lors de la fin de vie du système de climatisation sont progressivement améliorées, cette récupération reste encore un problème majeur.

Dans le domaine d'exploitation de la climatisation, les fluides chlorés et fluorés principaux (contenant des molécules composées de chlore, de carbone et de fluor) et faisant l'objet d'une attention toute particulière de la part des politiques et des législations sont les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrofluorocarbures (HFC) (Benhadid Bib, Benzaoui, 2012).

Les **chlorofluorocarbures** (CFC) sont des composés contenant du chlore, du fluor et du carbone. Ces molécules sont complètement halogénées car elles ne contiennent plus aucun atome d'hydrogène. Ces gaz ont la caractéristique d'être très stables et inertes, mais leur capacité de destruction de la couche d'ozone est extrêmement élevée, l'atome de chlore détruisant les molécules d'ozone.

Les **hydrochlorofluorocarbures** (HCFC) ont la même composition que les CFC, mais possèdent des atomes d'hydrogène. Ces gaz remplaceront progressivement les CFC car, étant moins stables, ils sont également moins destructeurs pour la couche d'ozone.

Enfin, les **hydrofluorocarbures** (HFC) se composent de carbone, de fluor et d'hydrogène. Leur capacité de destruction de la couche d'ozone est nulle, du fait que les HFC ne possèdent pas de chlore. A contrario, leur Potentiel de Réchauffement Global (PRG) est extrêmement élevé.

La banque totale de fluides frigorigènes (CFC, HCFC, NH₃, HC et CO₂) serait évaluée au niveau mondial à 3,5 millions de tonnes avec une émission moyenne annuelle de l'équivalent de 600 000 tonnes et 2,5 milliards de tonnes en équivalent CO₂ (Clodic *et al*, 2013). Rien que pour l'année 2015, le total des émissions de CO₂ dans l'atmosphère fut de 32 milliards¹². Cependant, actuellement ce sont les hydrofluorocarbures (HFC) qui inquiètent le plus. Commercialisés vers 1990, ils auraient contribué à 1% du réchauffement climatique jusqu'ici (Kauffield, 2012). Cela peut paraître peu mais ces HFCs présentent un Potentiel de Réchauffement Global nettement plus élevé que celui du CO₂. De plus, les HFCs sont en nette hausse dans une grande partie du monde, augmentant selon l'Institute for Governance and Sustainable Development (IGSD, 2015), de 10 à 15% annuellement, comparé à 4% pour le dioxyde de carbone et risquent encore d'augmenter (IGSD, 2012 ; IGSD, 2015). Alors qu'historiquement, les émissions de HFCs proviennent principalement des pays développés, c'est aujourd'hui surtout dans les pays en développement que la croissance se manifeste, ceux-ci étant responsables de 50% des émissions de ces gaz (Zaelke *et al*, 2017). De fait, les HFCs sont à présent reconnus pour être les GES les plus attendus à contribuer au réchauffement du climat au niveau global d'ici 2050 (UNEP, 2011 ; Velders *et al*, 2014 ; Purohit *et al*, 2016). En effet, si rien n'est fait, la demande croissante des climatiseurs et donc de ces réfrigérants pourrait signifier le relâchement de 8,8 Gigatonnes de CO₂ équivalent par an d'ici 2050 (UNEP, 2015a), sachant que pour l'année 2013, les émissions des six GES couverts par Kyoto (le Dioxyde de Carbone, le Méthane, le Protoxyde d'Azote, les Perfluorocarbures, l'Hexafluorure de Soufre et les Hydrofluorocarbures) étaient de 54 GtCO₂équivalent (MEEM, 2017). Le Council On Energy Environment and Water India (CEEW) affirme d'ailleurs que ces gaz pourraient être tenus pour responsables pour 32% de l'impact total sur le réchauffement climatique provenant du secteur de l'air conditionné résidentiel en Inde d'ici 2050 ! (Chaturvedi, Sharma, 2016). Au niveau mondial, d'ici 2050, les émissions annuelles de HFCs pourraient représenter l'équivalent de 12% des émissions annuelles de CO₂ selon le scénario BaU. Et donc être responsables d'une hausse des températures de 0,1°C d'ici le milieu du siècle et de 0,5°C d'ici 2100 (Zaelke *et al*, 2017).

Trois fluides frigorigènes majeurs ont été exposés, à noter qu'il existe de nombreux mélanges contenant des CFCs ou des HFCs ainsi que d'autres substances en lien avec la climatisation

¹² <https://www.planetoscope.com/co2/261-emissions-mondiales-de-co2-dans-l-atmosphere.html>

comme les halons, le bromure de méthyle ou le tétrachlorure de carbone mais présentant une consommation et utilisation moindres (UNEP, 2015).

- **Augmentation des consommations d'électricité, problèmes infrastructurels et pressions sur le réseau électrique**

Le domaine de l'énergie et de l'électricité soulève de nombreuses problématiques, notamment en ce qui concerne son accès et son intensification, repartis inégalement sur le globe, ou même les sources énergétiques utilisées selon les différentes régions du monde. En effet, l'énergie peut, encore aujourd'hui, être considérée comme une richesse inégalement consommée. Alors que l'approvisionnement électrique et le droit à l'énergie est primordial pour l'accomplissement des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD)¹³ censés avoir été atteint en 2015, c'est aujourd'hui encore 40% de la population mondiale qui est privée d'électricité, celle-ci se situant quasiment totalement dans les pays en développement. De plus, les énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel y sont encore majoritairement utilisées, et c'est le cas en Inde (Benhadid Bib, Benzaoui, 2012).

Le Rapport de 2016 portant sur l'efficacité de la climatisation dans certains pays du Maghreb (Khalfallah et al, 2016) distingue alors deux types de consommation énergétique liés aux équipements d'air conditionné : la consommation directe et la consommation indirecte. La première se réfère à la surconsommation d'énergie entraînée par la fuite d'une partie du fluide qui contient un climatiseur, diminuant fortement la performance énergétique de l'équipement. La seconde représente la consommation d'énergie électrique produite par ces équipements frigorifiques.

Une étude affirme que pour l'année 2012, la consommation associée de ces équipements (climatisation et réfrigération), aurait représenté 20% de l'électricité totale mondiale (GIZ, 2012). Dans son scénario de référence relatif aux changements climatiques, l'IPCC estime que la demande énergétique imputable au conditionnement d'air au niveau résidentiel et en été devrait être multipliée par plus de 13 entre 2000 et 2050 et par plus de 30 d'ici 2100 (IFF, 2015).

Par ailleurs, l'air conditionné représente une des sources d'électricité et donc d'énergie les plus demandées dans les pays en voie de développement depuis ces dernières années, surtout dans les économies émergentes comme le Brésil, le Mexique ou l'Inde (IGSD, 2012). Cela se remarque déjà dans de nombreuses grandes villes comme Istanbul, Rio de Janeiro, Shanghai ou New Delhi (IGSD, 2015), alors qu'historiquement, la consommation d'électricité liée au secteur résidentiel était relativement faible en comparaison avec d'autres secteurs comme l'industrie (Koizumi, 2007).

En outre, pour l'Inde, les estimations du Center for Sciences and Environment (CSE) montrent que les Room Air Conditioners (RAC) consommeraient environ 96TWh d'électricité s'ils fonctionnaient selon leur indice d'efficacité, en moyenne 8 heures par jour et 180 jours par an. Cela signifie que rien que pour les années 2014-2015, ces équipements étaient responsables de presque un tiers des 295 TWh d'électricité consommés par les ménages et les bureaux indiens,

¹³ Les OMD: forment un plan approuvé par tous les pays du monde et par toutes les grandes institutions mondiales de développement. Ils ont galvanisé des efforts sans précédent pour répondre aux besoins des plus pauvres dans le monde et arrivent à expiration à la fin 2015. En ligne: <http://www.un.org/fr/millenniumgoals/>

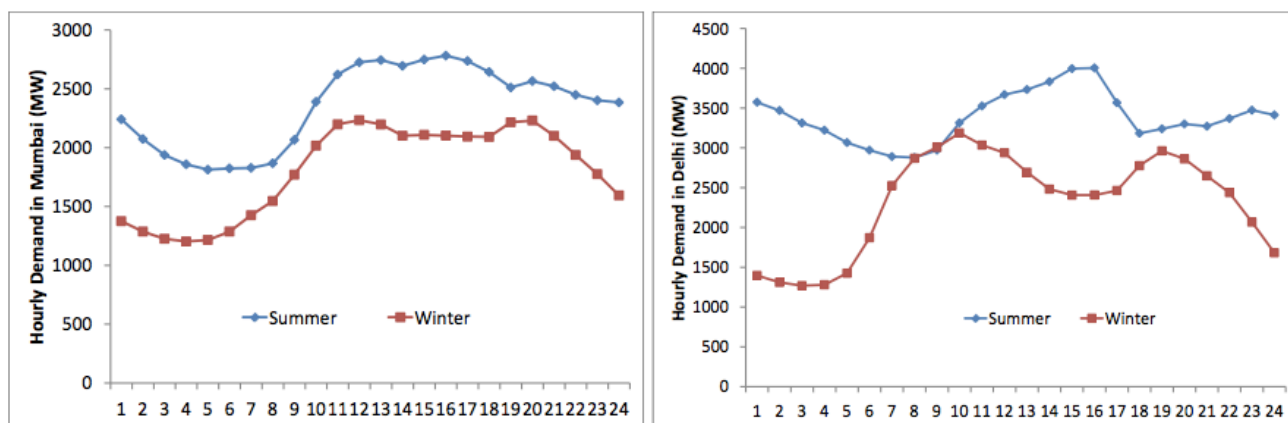
comme reporté par le Central Electricity Authority (CEA) (CSE, 2016). De manière générale, un logement climatisé en Inde pourrait consommer jusqu'à huit fois plus qu'un logement possédant uniquement un ventilateur de plafond (de type pales) (Pellegrino, 2013).

Toutefois, la forte demande en consommation d'énergie que représente l'utilisation de ces climatiseurs pose une problématique supplémentaire qui est celle de la pauvre qualité de l'énergie et surtout celle de la fourniture en électricité (ISHRAE, 2015). Les 30 et 31 juillet 2012 par exemple, l'Inde a connu la plus grande panne d'alimentation en électricité au monde. Cette panne a touché plus de 620 millions de personnes (The Guardian, 2012 ; Peterson, 2015), causée par une période de forte chaleur, intensifiant donc la demande en énergie principalement liée à l'usage de pompes à eau et de systèmes d'air conditionné. Cette demande intense a provoqué une pression énorme sur le réseau électrique indien, qui s'est traduite par ce qu'on appelle la « charge limite de pointe », pouvant entraîner des problèmes de production, de transport et de distribution d'électricité alors que le réseau est déjà fragile et sous tension (Grignon Massé, 2010). La « charge de pointe » est définie comme suit : « quantité maximale d'électricité consommée enregistrée pendant une période donnée » ou encore « la valeur la plus élevée de la puissance absorbée ou fournie par un réseau ou un ensemble de réseaux dans un pays »¹⁴

Début 2016, la capacité de production d'électricité installée connectée au réseau indien était de 300 GW (IEA, 2016). Les systèmes d'air conditionné et leur utilisation massive et concentrée sont significativement responsables de ces épisodes de charge limite de pointe, le Bureau of Energy Efficiency (BEE) estimant qu'ils contribuaient à quasiment 60% du pic de demande d'électricité dans la ville de Delhi (Jaiswal, 2015). Ceci s'explique par une corrélation saisonnière ainsi qu'une corrélation diurne. La première s'apparente au fait que, comme démontré plus haut avec les Degrés Jour Refroidissement (DJR), lorsque les températures sont hautes, l'usage de climatiseurs augmente, le pic de consommation énergétique lié à l'air conditionné ayant lieu durant l'été (au contraire du pic de consommation hivernal dû au chauffage dans les régions tempérées). La deuxième corrélation suppose que dans le secteur résidentiel, le pic de consommation aurait lieu plutôt la nuit, contrairement au secteur commercial où cela se passerait la journée. A noter que ces deux consommations se chevauchent durant plusieurs heures de l'après-midi, ayant pour conséquence une forte pression sur le réseau électrique (Phadke *et al*, 2014).

Traditionnellement, ces pics de demande d'électricité atteignaient leur maximum aux heures de soirée, lorsque les lumières artificielles étaient allumées et les appareils ménagers en marche (CSE, 2016). Mais actuellement, cette tendance se modifie, avec des charges limite de pointe se situant durant l'après-midi (vers 15heures) dans les villes comme Delhi et Calcutta et imputables à l'utilisation de l'AC. Ce pic chute alors de presque 40% pendant l'hiver pour Bombai et 25% pour Delhi. En fait, de manière générale, le refroidissement artificiel peut être responsable de 40 à 60% de la charge maximale estivale dans les climats chauds (comme Delhi).

¹⁴ Définition « charge limite de pointe » : En ligne : <http://www.linguee.fr/francais-anglais/traduction/charge+de+pointe.html>



(a) Mumbai

(b) Delhi

Figure 20.: Demande énergétique en fonction des heures, en été et en hiver à Bombay et à Delhi. Source : Phadke et al, 2014

Il est démontré qu'à Delhi, l'air conditionné est devenu l'équipement demandant la plus haute consommation d'énergie durant les mois les plus chauds, représentant ainsi 28% de la consommation totale électrique mensuelle (CSE, 2016).

Précédemment, il a été relevé que l'urbanisation était un des facteurs incitant l'usage d'un climatiseur. Le Central Electricity Authority (CEA) s'est alors penché sur les différences d'énergie dans les régions rurales et les régions urbaines. Il est apparu que la ville de Delhi consommerait plus d'électricité que n'importe quel autre état et que le pic de demande énergétique aurait doublé en une dizaine d'années, augmentant plus rapidement que la population et étant attribué principalement à ce type de système de refroidissement d'air. Le CEA estime que ce pic pourrait alors dépasser les 12 000 MW en 2021, alors que celui-ci fut de 6 260 MW le 1^{er} juillet 2016 à Delhi (CSE, 2016). Pour toute l'Inde, la croissance des ventes de climatiseurs pourrait doubler la consommation d'électricité maximale de 75 000 MW en 2013 à 150 000 MW d'ici 2030 (Diddi, 2014).

Il semble alors que les « pointes maximales de courte durée » peuvent sensiblement nuire aux efforts réalisés à long terme, nécessitant de gérer au mieux cette notion de « charge de pointe » dans les pays au réseau électrique fragilisé (CSE, 2016).

○ L'effet d'îlot de chaleur urbain

Un des derniers effets en lien avec l'environnement est le principe d'« îlot de chaleur urbain ».

Celui-ci est un « phénomène d'élévation des températures localisées en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines. » « Ces îlots thermiques sont des microclimats artificiels provoqués par des activités humaines (centrales énergétiques, échangeurs de chaleur,...) et par des

techniques d'urbanisme (surfaces sombres qui absorbent la chaleur, comme le goudron) »¹⁵. Divers facteurs entrent alors en jeu comme les moments de la journée, l'occupation du sol et son albédo, la circulation de l'air, etc. Ce phénomène présente des conséquences sur le climat et est à l'origine de transformations de phénomènes météorologiques comme la diminution de l'humidité relative, la modification du régime des pluies, l'augmentation des températures,... plus l'aggravation des épisodes de canicule et la modification de la biodiversité (Cantat, 2004). Ces « îlots de chaleur » freinant également la baisse nocturne des températures, ce qui accentue l'inconfort thermique, car l'organisme est alors obligé, de jour comme de nuit, de lutter pour faire baisser sa température corporelle (Cantat, 2004).

Cet effet d'« îlot de chaleur urbain » couplé aux vagues de chaleur risque d'influencer l'augmentation de la demande énergétique future (Pellegrino *et al*, 2015).

Une étude réalisée à Phoenix aux Etats-Unis, par une équipe du journal of Geophysical Research Atmosphere démontre que la chaleur produite par l'ensemble des systèmes d'air conditionné augmenterait jusqu'à 1°C les températures nocturnes de certaines zones urbaines (The Guardian, 2014 ; Pellegrino *et al*, 2015). En effet, l'Arizona State University affirme que les systèmes de climatisation émettent de la chaleur en excès la journée, lorsque la demande est la plus forte, mais que sa différence en terme de sensation est quasi négligeable en journée vu les températures déjà élevées (The Guardian, 2014).

En Inde, même dans les régions plutôt sèches, des microclimats aux températures beaucoup plus élevées que la température ambiante globale peuvent être relevées en région principalement urbaine. Une étude menée par l'Indian Institute of Technology Delhi (IIT) a conclu que les centres urbains indiens représentaient des zones idéales de développement de phénomène d'« îlot de chaleur urbain » (CSE, 2016). Cette étude affirme que c'est dans les noyaux urbains de Delhi que l'effet de chaleur urbain est le plus significatif, avec des températures allant jusqu'à 10°C de plus que les températures globales ambiantes enregistrées. Ces lieux sont également et surtout les plus rafraîchis par une consommation d'air conditionné importante. Les climatiseurs, en relâchant des GES, participent donc indirectement à l'augmentation de cet effet d'« îlot de chaleur urbain » (CSE, 2016 ; The Guardian, 2014).

¹⁵ Futura Sciences. En ligne : <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-ilot-chaleur-urbain-5473/>

Chapitre V : Les alternatives et solutions proposées

Alors que traditionnellement, les populations s'adaptent par différents comportements permanents (refroidissement naturel, isolation,...) ou transitoires (port de vêtements adéquats, ouverture des fenêtres,...) à la hausse des températures, certains acteurs conscients des différents impacts que l'utilisation des climatiseurs peut représenter sur l'environnement, ont décidé d'agir par des législations et des politiques d'utilisation. Cela peut se traduire par l'introduction de systèmes plus efficaces et/ou par des climatiseurs fonctionnant à l'énergie solaire par exemple.

Politiques relatives aux fluides frigorigènes

Au cours des années, la production, l'utilisation et la consommation des fluides frigorigènes ont évolué, en fonction des politiques et surtout des différentes préoccupations de sécurité, de santé humaine, de durabilité, ou même de protection de la couche d'ozone et ensuite de réchauffement climatique en fonction des contextes et des périodes dans lesquels ils s'inscrivent. Différentes générations de fluides se sont alors succédées, tentant de trouver le fluide frigorigène optimal. Progressivement des programmes d'encadrement et des politiques permettant d'éliminer les substances nuisibles à l'environnement furent menés par les gouvernements de nombreux pays, présentant des succès plus ou moins notables (Letschert *et al*, 2008).

Les deux principaux Protocoles ayant régulé l'utilisation et la commercialisation de fluides frigorigènes nocifs furent le Protocole de Montréal en 1987 et le Protocole de Kyoto en 1997.

o Le Protocole de Montréal

Dans les années 70, plusieurs études menées notamment par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et d'autres organismes aux Etats-Unis, ont analysé les éventuelles perturbations causées par l'avion supersonique le *Concorde* dans la stratosphère. De fortes teneurs en substances nocives comme le CFC-11 ont été enregistrées. Dans les années 80, un trou dans la couche d'ozone situé au-dessus de l'Antarctique alarma la communauté scientifique sur ses conséquences possibles sur l'environnement. Progressivement, une prise de conscience à abouti à un consensus politique lors de la Conférence de Vienne sur la protection de la couche d'ozone en 1985 et la signature du Protocole de Montréal deux ans plus tard. Dans le but de réduire, voire d'éliminer l'utilisation totale des Substances Appauvrissant la Couche d'Ozone (SACO) (Ross, 2012).

Ce protocole fut signé le 16 septembre 1987 par vingt-quatre pays participants ainsi que la Communauté Economique Européenne (CEE) et entra en vigueur le 1^{er} janvier 1989 (Cappellin, 2013). En 2009, ce sont plus de 190 pays qui seront signataires du Protocole, faisant de celui-ci le protocole environnemental le plus largement adopté, permettant notamment au secteur du froid de diminuer ses impacts nocifs sur la planète. Plus concrètement, un calendrier international progressif d'arrêt de production et de commercialisation des chlorofluorocarbures (CFC) et des hydrochlorofluorocarbures (HCFC) fut établi ainsi que le remplacement progressif par des substituts de transition : les hydrofluorocarbures (HFC) (Velders *et al*, 2009).

Au terme de ce traité, les différents pays se sont vus attribuer des responsabilités égales mais différenciées en terme de délais d'application. Ces directives obligèrent les pays développés à agir en premier, afin d'acquérir expérience et expertise pour ensuite encadrer les pays en développement (IGSD, 2015 ; UNEP, 2015).

Les premiers gaz visés par le Protocole furent les CFCs, avec pour obligation leur suppression totale pour le 1^{er} janvier 1996 pour les pays développés et dix ans plus tard pour les pays compris dans l'Article 5, les pays en développement (Clodic *et al*, 2013). Sauf pour quelques exceptions comme le milieu médical par exemple, où leur utilisation est encore autorisée (Benhadid, Benzaoui, 2012). En ce qui concerne les HCFCs, l'arrêt de production et de commercialisation visait décembre 2010 pour les pays développés (l'Europe avait déjà entamé des mesures dès 2000), les consommations de HCFC devant être réduites de 75% pour 2010, de 90% pour 2015 et quasiment complètement pour 2020. Objectif pratiquement atteint pour l'Europe, le Japon et sur la bonne voie pour les Etats-Unis (Velders *et al*, 2009). Concernant les pays en développement, cet objectif n'est pas encore atteint et devrait l'être totalement pour 2030.

L'agenda indien programme une diminution de sa consommation nationale de HCFCs, sa production domestique, ses importations et exportations de 10% pour 2015, 35% pour 2020, 67,5% pour 2025 et 97,5% pour 2030. Pour 2040, l'objectif à atteindre est l'arrêt total de production et de consommation des réfrigérants de type HCFC (Velders *et al*, 2009 ; Palakshappa, 2013).

Le Protocole de Montréal avait pour objectif final l'introduction progressive d'une substance alternative, l'hydrofluorocarbure (HFC) mais dont la conséquence involontaire fut le risque d'augmentation des températures, ce nouveau fluide possédant un Potentiel de Réchauffement Global (PRG) particulièrement élevé.

○ Le Protocole de Kyoto et l'amendement de Kigali

Signé le 11 décembre 1997, ce second protocole international décisif entra en vigueur le 16 février 2005. Celui-ci vise la réduction des émissions de six gaz à effet de serre ou groupes de gaz : le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones dont les hydrofluorocarbures (HFC) (Cappellin, 2013). Ce protocole bâti sur la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CNUCC) de 1992 met en place des objectifs légalement contraignants ainsi que des délais de limitation d'émissions pour les pays qui l'ont signé (Calm, 2002). Afin d'atteindre un objectif de réduction des taux d'émissions des six GES d'au moins 5% par rapport au taux de 1990, et ce au niveau global et pour la période 2008-2012, des limites d'émissions individuelles sont imposées pour les pays signataires. Il faut préciser que les accords de Kyoto n'imposent pas l'arrêt définitif des fluides frigorigènes comme le HFC à proprement parlé (à l'instar du Protocole de Montréal) mais prennent en considération plutôt toutes les substances chimiques ayant un PRG élevé et étant considérées comme nocives pour l'environnement.

D'autres amendements viendront compléter ces deux protocoles ce qui fut le cas par exemple de « l'amendement de Kigali » en octobre 2016, durant lequel les signataires du Protocole de Montréal ont signé la fin progressive des HFCs. L'amendement impose des calendriers d'arrêt différents selon trois catégories de pays : les pays dits « développés » doivent réduire leur

consommation de 10% d'ici 2019 par rapport aux niveaux de 2011-2013, ce chiffre augmentant à 85% d'ici 2036 ; les pays en développement (comme la Chine) s'engagent à commencer la transition en 2024, réduisant de 10% les consommations par rapport aux niveaux de 2020-2022, puis à 80% en 2045. Enfin d'autres pays en développement comme l'Inde s'engagent à entamer la transition en 2028, avec une diminution de 10% par rapport à 2024-2026 et devant être quasiment complète (85%) pour 2047 (Zaelke *et al*, 2017).

	Non-A5 (developed countries)	A5 (developing countries) Group 1	A5 (developing countries) Group 2
Baseline HFC component	2011-2013 (average consumption)	2020-2022 (average consumption)	2024-2026 (average consumption)
Baseline HCFC component	15% of baseline	65% of baseline	65% of baseline
Freeze	-	2024	2028
1st step	2019 - 10%	2029 - 10%	2032 - 10%
2nd step	2024 - 40%	2035 - 30%	2037 - 20%
3rd step	2029 - 70%	2040 - 50%	2042 - 30%
4th step	2034 - 80%	-	-
Plateau	2036 - 85%	2045 - 80%	2047 - 85%
Notes	Belarus, Russian Federation, Kazakhstan, Tajikistan, Uzbekistan, 25% HCFC component and 1st two steps are later: 5% in 2020, 35% in 2025	Article 5 countries not part of Group 2	GCC (Saudi Arabia, Kuwait, United Arab Emirates, Qatar, Bahrain, Oman), India, Iran, Iraq, Pakistan

Tableau 2: Calendrier des étapes d'élimination des HFCs selon les groupes de pays sous l'amendement de Kigali. Source : EIA, 2016.

On estime alors que cet accord permettrait d'éviter l'équivalent de minimum 80 GtCO₂équivalent d'ici 2050 (IGSD, 2015). A plus long terme, cette réduction cumulée des émissions au niveau global pourrait éviter jusqu'à 0,5°C de réchauffement d'ici 2100 (Zaelke *et al*, 2017).

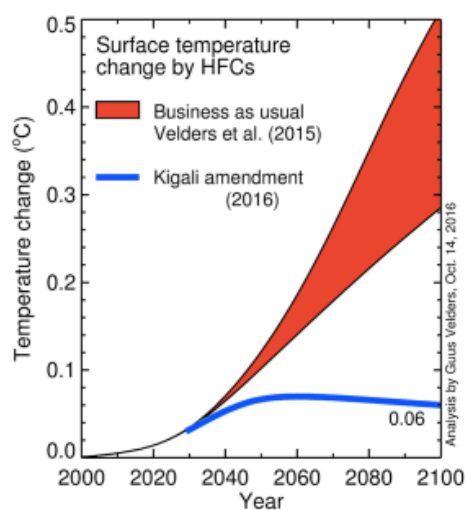


Figure 21: Le réchauffement évité via l'amendement de Kigali, selon un scénario BaU. Source : Zaelke *et al*, 2017.

Cependant, l'arrêt de production et la suppression totale des HFCs d'ici 2050 pourraient coûter à l'Inde jusqu'à 30 millions d'euros. Certains états et organismes donateurs privés se sont engagés à aider l'Inde dans ses démarches (Thiberge, 2016).

Les substances alternatives

Comme abordé ci-dessus, déjà beaucoup de pays dits « développés » tentent d'éliminer au maximum les HFC, en 2015, l'Union Européenne (UE) a par exemple déjà mis en place un règlement pour diminuer les émissions de HFC de deux tiers par rapport aux émissions de 2014. L'Australie, la Chine, le Japon et les USA tentent également d'éliminer ces gaz, par des réglementations, des taxes, ou même des primes pour l'utilisation d'alternatives (Jaiswal, 2015).

Les options en terme purement technique concernant ces alternatives sont relativement universelles mais ce sont bien les réglementations locales, les standards économiques ou encore les compétitivités de marché qui présentent des facteurs influençant l'introduction de ces technologies et leurs mises en œuvre (UNEP, 2010). L'Inde fut par exemple réticente à l'idée d'éliminer rapidement les HFC lors de l'amendement de Kigali. Alors que le marché de la climatisation est en pleine expansion, les technologies utilisant une substance alternative sont généralement plus chères, pouvant représenter un motif de dissuasion pour les consommateurs et donc un frein pour l'économie indienne (Thiberge, 2016).

Le défi actuel du froid demeure l'introduction de substances dites alternatives, l'idéal étant un réfrigérant naturel qui ne posséderait pas de molécules de chlore ou de fluor, avec un Potentiel d'Appauvrissement de la couche d'Ozone (PAO) nul et un Potentiel de Réchauffement Global (PRG) faible, présentant des hautes propriétés d'isolation, chimiquement stable, non inflammable ni toxique et corrosif, disponible dans tous les pays et enfin, pouvant offrir une efficacité énergétique supérieure à ce qui est disponible aujourd'hui (Benhadid, Benzaoui, 2012 ; Kauffield, 2012; UNEP, 2015). Deux catégories de fluides sont alors retenus : les fluides naturels et les fluides synthétiques « eco friendly » comme l'hydrofluoroléfine (HFO) pour la climatisation automobile. Il est évident que très peu d'alternatives présentent toutes ces caractéristiques en même temps. Cependant, quelques substances alternatives présentent un réel potentiel.

C'est le cas des **hydrocarbures** (HC) recommandés notamment par l'Organisation non gouvernementale (ONG) *Greenpeace* comprenant le Propane, le Butane ou l'Isobutane par exemple. Ces gaz sont moins chers que les réfrigérants synthétiques, possèdent un PRG en-dessous de vingt et un PAO nul (Kauffield, 2012). Ces hydrocarbures représenteraient déjà un taux de pénétration de 55% dans les pays industrialisés. L'Inde, elle, tente d'introduire progressivement des technologies plus efficaces et économiques en se tournant vers des fluides tels que le HC-290 (le propane). Celui-ci possède un PRG de moins de 5, contre 1760 pour le R22 actuellement majoritaire dans le pays. Il y aurait l'équivalent de 100 000 RAC utilisant le R290 vendus actuellement en Inde (CEEW, NRDC, 2014).

L'**ammoniac** (NH₃) ou R-717 est également considéré comme pouvant être une bonne alternative aux HFC car il possède un PRG égal à zéro, le PRG le plus petit de tous les réfrigérants. Ce gaz fut d'ailleurs le premier fluide frigorigène utilisé commercialement sur un bateau frigorifique dans les années 1850.

L'eau (H₂O) pourrait également être une piste, envisagée dans la climatisation solaire également, car c'est un fluide inorganique et sans toxicité (Benhadid, Benzaoui, 2012 ; Kauffield, 2012).

Enfin, le **dioxyde de carbone** (CO₂) ou R-744, utilisé depuis le début du 20^{ème} siècle dans les systèmes frigorifiques, présente une option réelle (Clodic *et al*, 2013). Avec comme avantage supplémentaire d'être un coproduit dans de nombreuses industries, sa production ne présentant alors qu'une faible consommation d'énergie (Guignard, Timmermans, 2005). Bien que considéré comme un des plus gros responsable du réchauffement climatique, son utilisation dans ce type d'application (AC) est envisageable car c'est un produit « rebut » (sous-produit) et ne représentant donc pas de relâchement direct dans l'atmosphère. Aussi, en faibles concentrations, le R-744 ne serait pas toxique (Kauffield, 2012).

Les programmes de Standards et de Labels (S&L)

En Inde, afin de gérer la croissance de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment, et de répondre à la pression énergétique des besoins en refroidissement, le Bureau of Energy Efficiency (BEE) a initié en 2006 un programme de Standards et de Labels (S&L) pour les équipements énergétiques (Peterson, 2015). Le BEE est au départ une agence du gouvernement indien, créée en mars 2002 dans le cadre de l'Energy Conservation Act (2001) dont l'objectif principal est de réduire l'intensité énergétique de l'économie indienne. Ce bureau a mis en place un système de normes et d'étiquetages afin de fournir au consommateur l'information nécessaire pour faire un choix éclairé en ce qui concerne l'efficacité énergétique et donc le potentiel d'économie en terme de coût du produit. Après étude, un nombre d'étoiles sera attribué à chaque produit en fonction de son efficacité en énergie (Sing et Sant, 2011). Ce système de classement par étoiles est devenu obligatoire en 2010 pour les climatiseurs et impose un standard minimum de taux d'efficacité énergétique, le Energy Efficiency Ratio (EER). Plus ce taux d'efficacité énergétique est élevé, moins l'équipement consomme de l'énergie, et plus haut il se placera dans le classement (CSE, 2016). Cela représente donc un label compétitif permettant aux consommateurs de comparer les différents niveaux d'efficacité d'un appareil (Peterson, 2015).

Actuellement, le EER minimum autorisé pour un air conditionné de type « fenêtre » est de 2.5 w/w et ces climatiseurs possédant un EER au dessus de 3.3 w/w sont donc labélisés 5 étoiles. Pour les « splits systems », le EER minimum se situe à 2.7 w/w or, pour atteindre les 5 étoiles, celui-ci devrait se trouver au dessus de 3.5 w/w (CSE, 2016). Il s'avère que parmi plusieurs états comme le Japon, l'Afrique du Sud, le Brésil ou encore l'Union européenne, c'est en Inde que les taux d'efficacité énergétique sont les plus faibles, le taux moyen (de tous les RAC vendus en Inde) étant équivalent au taux minimum autorisé en Chine par exemple (Phadke *et al*, 2014). L'enjeu serait donc de combler l'écart entre l'efficacité moyenne des appareils du marché indien et les meilleurs appareils disponibles dans le monde.

Le label BEE sous-entend que les fabricants produisent eux-mêmes un rapport d'évaluation basé sur un test d'efficacité énergétique reprenant les normes indiennes. Le modèle de RAC se voyant alors assigné une place dans le classement et un nombre d'étoile basé sur des données fournies et auto-déclarées par le fabricant sans aucun contrôle (à l'exception d'une centaine effectuée par

l'organisme de manière aléatoire). Le risque réside donc dans le fait que certains fabricants déclarent avoir un certains EER qui est beaucoup plus faible dans la réalité (CSE, 2016).

Plus concrètement, en ce qui concerne la consommation d'électricité des équipements, un appareil RAC qui s'est vu attribuer un label 5 étoiles est supposé consommer jusqu'à 22% en moins qu'un équipement présentant une seule étoile. Néanmoins, lors des pics de chaleur estivale et lorsque la température dépasse les 40°C, les RAC 5 étoiles pourraient encore consommer entre 10% et 28% de plus que leur capacité réelle déclarée (CSE, 2016). D'après le BEE, ce programme aurait permis d'économiser 1,4 million de GWh pour les années 2007-2008. D'après le Laboratoire National Lawrence-Berkeley (LBNL), il pourrait être encore économisé jusqu'à 27 TWh d'utilisation d'électricité d'ici 2020, représentant 14% de la consommation d'air conditionné. Sans un tel programme basé sur l'efficacité énergétique, le scénario serait alors une consommation de 42TWh en 2010, 195 TWh en 2020 et 552 TWh en 2030 associée à la climatisation (Peterson, 2015).

De 1990 à 2005, le nombre de programmes de type Standards and Labels (S&L) a augmenté, incluant une majorité de pays en développement, ce qui prouve qu'ils se sentent concernés et désireux de s'impliquer dans le contrôle de leur consommation énergétique (McNeil, Letschert, 2008).

La climatisation solaire

La climatisation solaire désigne l'ensemble des moyens de climatiser en utilisant comme ressource énergétique primaire l'énergie acquise par les rayonnements solaires¹⁶.

Historiquement, c'est le 29 septembre 1878, lors de l'exposition universelle de Paris qu' Augustin Mouchot produit le premier bloc de glace en utilisant l'énergie du soleil et ce, via un capteur solaire d'environ 4 mètres de diamètre et un absorbeur de 92 litres d'eau. Les crises pétrolières des années 70 et l'augmentation du coût du pétrole ont permis à de nombreux projets de développement de technologies de refroidissement solaire d'être présentés au public. Mais très vite ces technologies à énergie alternative ont été délaissées, le prix du baril redevenant abordable (Papillon, 2012).

o Avantages et opportunités

Ce mode de climatisation est un réel enjeu dans un contexte de hausse du coût des énergies fossiles, de raréfaction d'autres sources d'énergie bon marché (le pétrole conventionnel par exemple), d'incertitude à propos de l'avenir du nucléaire mais surtout dans un contexte de lutte contre le changement climatique (Cheilan, 2004 ; Meunier & Mugnier, 2013). Dans le cas de la climatisation par rayonnements solaires, la production de froid se réalise alors grâce à une source d'énergie à priori inépuisable, n'utilisant pas de fluides frigorigènes nocifs pour l'environnement puisqu'il s'agit d'eau ou de solutions salines, et présentant une consommation électrique moindre

¹⁶ ActuEnvironnement, Dossier Climatisation solaire. En ligne : https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/climatisation_solaire/climatisation_solaire.php4

(pouvant être jusqu'à 20 fois inférieure à celle d'un système classique). Par ailleurs, l'absence de compresseur mécanique diminuerait les entretiens nécessaires à la machines et entrainerait donc une longévité prolongée ainsi qu'un niveau sonore réduit. Son installation dans des locaux plus « sensibles » comme les centres culturels, les centres médicaux, les hôtels,... serait donc plus qu'adéquat (Meunier & Mugnier, 2013).

Produisant une puissance moyenne de 1000W/m², l'énergie solaire serait 10 000 fois supérieure à la demande énergétique globale de la population actuelle, et ce pour les 5 milliards d'années à venir¹⁷. Une des caractéristiques primordiales de la climatisation solaire est son adéquation entre le besoin de froid ou de climatisation lorsque l'énergie solaire est à son maximum, que ce soit tout au long de l'année ou quotidiennement durant l'été (Papillon, 2012 ; Meunier & Mugnier, 2013).

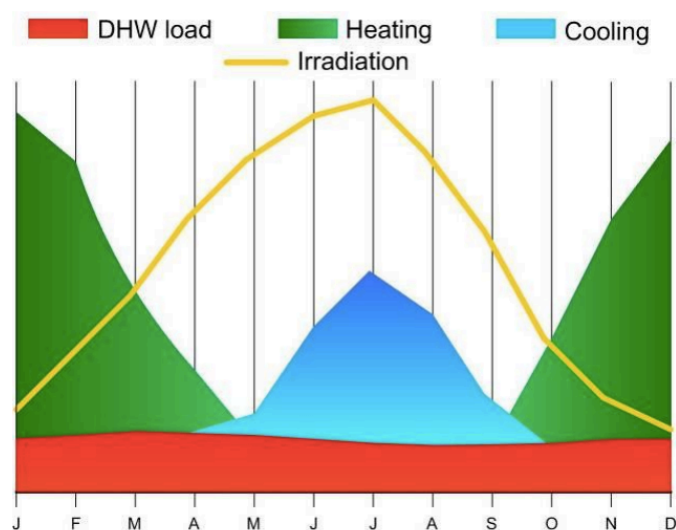


Figure 22 : Une adéquation entre les ressources et les besoins. Source : Papillon, 2012

Enfin, le secteur de l'énergie solaire présenterait d'autres avantages que ceux liés à l'énergie. Celui-ci serait notamment synonyme de création d'emplois au niveau local et offrirait une « green image » à certaines entreprises ou fabricants (Padigal *et al*, 2014).

○ Inconvénients et barrières

Il est important de préciser que le « froid solaire » présente également des inconvénients, les principaux résidant dans son intermittence et sa variabilité (Meunier, Mugnier, 2013). Effectivement, ce type de technologie ne fonctionne qu'en journée, étant alors plus adaptée pour des climatisations de bureaux, d'entreprises, etc. Toutefois, de plus en plus de techniques de

¹⁷ ActuEnvironnement, Dossier Climatisation solaire. En ligne : https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/climatisation_solaire/climatisation_solaire.php4

stockage de chaleur tentent à se développer (les techniques de ballons d'eau tampon par exemple). Bien qu'inépuisable, l'énergie solaire est inégalement répartie sur le globe, atteignant son maximum au niveau de l'équateur. Afin de pouvoir minimiser les pertes, il serait préférable que l'équipement de production soit installé à proximité de son lieu de consommation. C'est entre autre pour cette raison que l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) préfère parler de « systèmes de conditionnement d'air des bâtiments **assistés** par le solaire ». L'installation est alors alimentée selon un mix énergie solaire/énergie conventionnelle, la contribution solaire pouvant donc être plus ou moins importante. Ceci aurait pour conséquence qu'une installation fonctionnant uniquement à l'énergie solaire ne permettrait qu'un rafraîchissement de l'air de quelques degrés, alors qu'une installation s'alimentant grâce à un mix de ressource solaire et d'autre autre ressource énergétique sera plus efficace pour un réel abaissement de la température¹⁸.

Néanmoins, ces techniques ne sont pas encore assez compétitives par rapport aux systèmes classiques. Le coût d'investissement est encore trop élevé surtout pour des pays en développement. L'Energy Information Administration (EIA) estime que les coûts d'investissement des systèmes d'AC solaire pourraient être de deux à cinq fois plus élevés que ceux pour les systèmes conventionnels en présentant la même capacité énergétique. Ceux-ci seraient estimés entre 1 600 USD/kWh de refroidissement et 32 000 USD/kWh de refroidissement pour les systèmes à larges capacités (Padigal *et al*, 2014). Ensuite, même si des économies en terme de transport et d'importation de l'énergie peuvent être réalisées, le coût relativement abordable de l'électricité traditionnelle dissuade encore à investir dans l'énergie solaire.

Enfin, ces techniques de « froid solaire » présentent encore des limites, qu'elles soient techniques ou institutionnelles (Padigal *et al*, 2014). Le manque de main d'œuvre professionnelle, ainsi que le peu d'informations, d'études sur le terrain, ou d'aides financières telles que d'éventuels subsides destinés aux programmes de « Recherche et Développement » (R&D), freinent l'optimisation de ce genre de technologie (Philibert, 2006 ; Padigal *et al*). Mais également d'ordre juridique avec un manque d'autorisations d'installation ou de certificats verts de qualité par exemple, et principalement le peu de sensibilisation et de conscientisation envers les décideurs et les consommateurs, car ce système est encore considéré comme un système cher et compliqué à mettre en place (Philibert, 2006).

○ **Fonctionnement et techniques**

De manière plus théorique, deux types de fonctionnement peuvent être envisagés: la voie solaire thermique et la voie solaire photovoltaïque (Meunier, Mugnier, 2013). Soit le rayonnement solaire est capté via des panneaux photovoltaïques, ce qui produit de l'électricité, soit il est recueilli via des capteurs solaires thermiques qui produisent de l'eau chaude (Cheilan, 2004 ; Papillon, 2012). C'est aujourd'hui cette voie solaire thermique qui est la plus développée, car la plus adéquate à une utilisation intensive et économique.

¹⁸ ActuEnvironnement, Dossier Climatisation solaire. En ligne : https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/climatisation_solaire/climatisation_solaire.php4

Cette dernière technique se divise en deux grandes familles de climatiseurs solaires : les machines à cycle fermé et les machines à cycle ouvert. Les machines à cycle fermé produisent de l'eau glacée via à un procédé de refroidissement à sorption. Contrairement à la climatisation électrique traditionnelle qui produit du froid en comprimant un fluide, dans les machines à sorption, la compression mécanique est remplacée par une compression thermique (Papillon, 2012). Le principe de changement de phase (liquide/vapeur) du fluide frigorigène est conservé mais ce changement est provoqué par un apport de chaleur. Le fluide frigorigène est alors de l'eau additionnée d'un second composant. Si celui-ci est un liquide, on parle d'absorbant et de machine à absorption. A contrario, si le composant est un solide, on parle d'adsorbant et donc de machine à adsorption (Kim & Ferreira, 2008).

Pour les systèmes ouverts à dessiccation (DEC) ou à évaporation, l'eau est utilisée comme réfrigérant en contact direct avec l'air à refroidir. Ces systèmes de climatisation DEC augmentent l'humidité de l'air et réduisent la température ambiante (Cheilan, 2004 ; Kim & Ferreira, 2008).

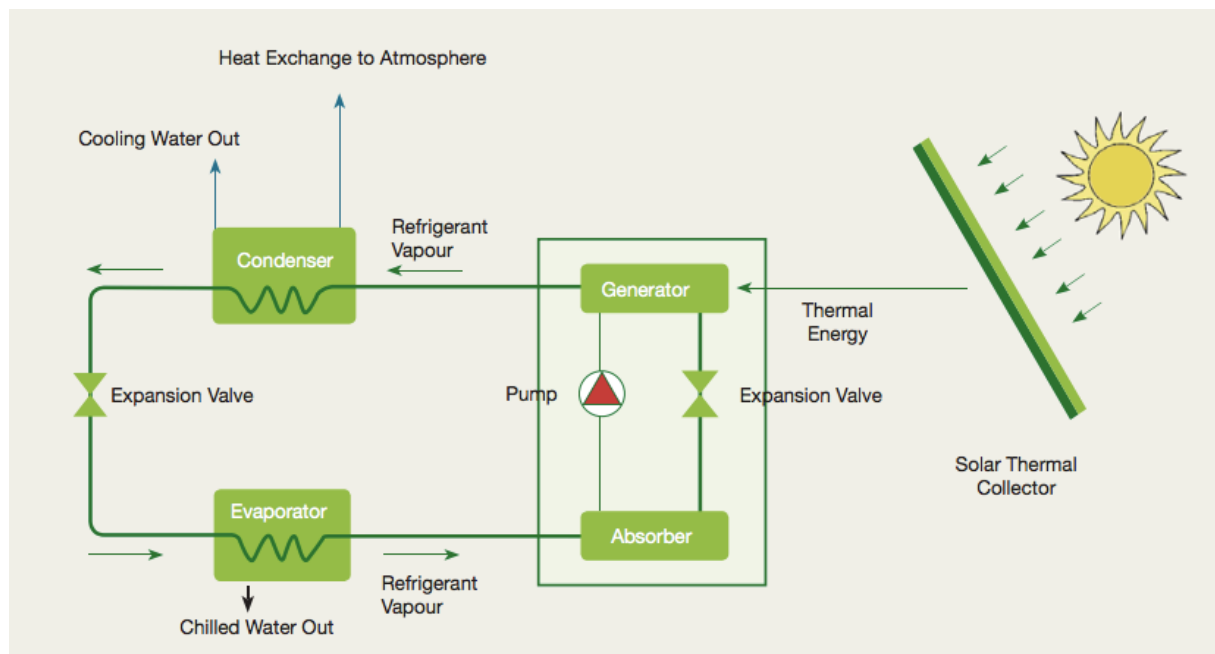


Figure 23: Diagramme schématique d'un système de refroidissement à sorption. Source : Padigal *et al*, 2014.

Cependant, ce type d'installations de rafraîchissement solaire suppose que le taux d'humidité de l'air ne soit pas trop important, dans quel cas il faut d'abord déshumidifier l'air avant de le refroidir. C'est le cas par exemple du climat européen. A l'heure actuelle, les systèmes fermés sont majoritairement utilisés, avec 60% environ des installations correspondant à des systèmes à absorption.

○ Les énergies renouvelables en Inde et « The National Solar Mission »

En Inde, le charbon représente encore actuellement plus de 60% de la capacité de production d'énergie (IEA, 2017). Les énergies renouvelables et les technologies associées pourraient alors permettre au pays de répondre au mieux la demande croissante en énergie ainsi qu'améliorer sa sécurité énergétique et surtout à diminuer les impacts environnementaux présents et futurs. Bien que représentant un investissement conséquent, l'Inde progresse depuis plusieurs années dans la voie des énergies renouvelables. Les résultats sont même déjà là, l'Inde représentant le quatrième pays le plus étendu en terme de nouvelles capacités photovoltaïques en 2016 ainsi que l'éolien en capacité cumulée (Waldron, 2017). A titre d'exemple, la capacité connectée au réseau du renouvelable a presque quintuplé de 2002 à 2010, passant de 3,5 GW à 16,8 GW, l'éolien étant le facteur principal de cette croissance (Remme *et al*, 2011). En 2015, ce sont près de 10 milliards de dollars qui furent dépensés, les énergies renouvelables représentant plus d'un tiers de l'investissement dans la production d'électricité contre un peu plus d'un quart l'année précédente (Waldron, 2017). Quant à l'énergie solaire thermique, en 2011, la puissance totale installée était de 3,3 GW, la part de l'énergie solaire dans son parc énergétique représentait alors 1,4% (CNRS, 2014).

De plus, l'Inde travaille depuis quelques années sur ce qu'on appelle « The National Solar Mission » approuvée sous le National Action Plan on Climate Change (NAPCC) et visant l'augmentation significative de la part d'énergie solaire dans le mix énergétique total indien. Cette mission consiste en plusieurs cibles et objectifs s'articulant en trois phases : le déploiement de 1GW connecté au réseau pour 2013, 4 GW pour 2017 pour ensuite atteindre les 20 GW en 2022 (Remme *et al*, 2011 ; MNRE, 2015b). En 2022, d'autres objectifs viseront les 2 GW d'applications solaires hors réseau (déconnectés du réseau électrique et donc indépendants des infrastructures centralisées comme les centrales au charbon par exemple), 20 millions de m² de zones de capteurs thermiques solaire et 20 millions de systèmes d'éclairage solaire (Remme *et al*, 2011). En 2014, le gouvernement indien annonçait qu'à la place de 20 GW initialement planifiés, ce serait 100 GW qui seraient déployés en terme de capacité solaire installée et ce, avant 2022. Cela comprendrait, entre autre, l'installation de 40 GW de systèmes de toits solaires connectés au réseau (MNRE, 2015b).

Par ailleurs, l'Inde a l'avantage d'être un pays tropical où le soleil est présent durant de longues heures par jour et de nombreux jours durant l'année. La plupart des régions possédant entre 300 et 330 jours d'ensoleillement par an (Remme *et al*, 2011 ; Padigal *et al*, 2014), l'intensité lumineuse pourrait alors représenter un réel potentiel puisque celle-ci équivaut à plus ou moins 5000 milliards de kWh/an. L'énergie solaire pourrait osciller entre 1600 et 2200 kWh/m². Toutefois, la variance saisonnière est élevée, la puissance solaire n'étant disponible que pendant les heures d'ensoleillement. L'orientation du soleil ainsi que les variations cycliques et épisodiques (dues à l'apparition de nuages par exemple) entraîneraient donc une certaine difficulté à assurer une gestion optimale lors de pics de consommation (Waldron, 2017).

L' « Eco Cooler », le premier climatiseur sans électricité

Une dernière alternative simple et efficace aux systèmes de climatisation classique est l'Eco Cooler¹⁹. Imaginé au Bangladesh et proposé par l'entreprise technologique *Grameen Intel Social Business*, désireuse de trouver des solutions technologiques accessibles à toute la population, cette première climatisation sans électricité est fabriquée à l'aide de bouteilles en plastique.

Alors que la climatisation solaire utilise une énergie à priori non épuisable, cette technique pourrait révolutionner le mode de vie des personnes les plus pauvres, puisqu'elle est applicable dans les villages privés d'électricité. Le principe est le suivant : des bouteilles en plastique (recyclées si possible) sont découpées au niveau du goulot et de sa base et sont placées dans les trous d'un carton qui sera ensuite fixé devant une porte ou une fenêtre.



Figure 24 : L'Eco Cooler et son installation. Source : Nowshin, 2017.

Techniquement, l'air chaud extérieur entrant par la partie la plus large de la bouteille subit une compression et ressort frais par la petite ouverture du goulot, où s'effectue une détente qui refroidit l'air. Le test peut être fait en soufflant sur la main avec la bouche grande ouverte (air chaud) puis avec la bouche ouverte au minimum, l'air devenant plus froid. Cette solution ferait baisser la température d'une pièce d'environ 5°C, permettant un confort de vie un peu plus acceptable pour les populations pauvres ne pouvant se permettre un luxe comme un simple ventilateur et encore moins un équipement comme le climatiseur. Il faut préciser que cette technique ne semble toutefois pas faire l'unanimité, certains se montrant sceptiques quant à sa fiabilité. Dans un climatiseur conventionnel, l'air chaud est généralement rejeté à l'extérieur, pour le cas de l'Eco Cooler, aucune technique ne permet à cet air de ressortir... Cependant, il semblait original et nécessaire de présenter en quelques mots une telle invention !

¹⁹ Nowshin N. (2017). *Zero-power cooling, with plastic*. En ligne: <http://www.thehindu.com/specials/impact-journalism-day-2017/eco-cooler-the-worlds-first-ever-zero-electricity-air-conditioner-made-out-of-plastic-bottles/article19108375.ece>

En conclusion

Avec la prise de conscience des effets néfastes des fluides frigorigènes sur la couche d'ozone ou sur le réchauffement climatique, plusieurs politiques ont été mises en place, à la recherche de substances alternatives plus respectueuses de l'environnement. D'ici 2050, une évolution vers des substances alternatives pourrait réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'air conditionné du secteur résidentiel indien de 38%, dont 15% seraient imputables à une réduction de la consommation énergétique due à une meilleure efficacité énergétique des systèmes et 23% dû à l'élimination progressive de fluides frigorigènes responsables du changement climatique (CFC, HCFC, et HFC) (Chaturvedi, Sharma, 2016). Avec l'accord récent de Kigali en octobre 2016, les estimations affirment que cela représenterait l'équivalent de 80 GtCO₂ évitées d'ici 2050. A plus long terme, cette réduction cumulée des émissions au niveau global pourrait éviter jusqu'à 0,5°C de réchauffement d'ici 2100 (Zaelke *et al*, 2017).

Recommandées par des politiques de gestion comme le programme « Standards & Labels » du BEE, de nouvelles techniques utilisant d'autres fluides frigorigènes permettraient une meilleure efficacité énergétique. D'après le LBNL, une attention particulière portée sur la performance énergétique et la mise en vente de systèmes plus efficaces pourrait réduire jusqu'à 14% la consommation énergétique d'AC d'ici 2020 (Peterson, 2015). Rappelons qu'une étude de 2012 du LBNL a avancé que, pour répondre efficacement à la demande d'électricité croissante pour ce type d'équipement, il faudrait construire l'équivalent de 300 nouvelles centrales à charbon de 500 MW chacune. Reprenant ce postulat, une autre étude (Phadke *et al*, 2014) prétend, elle, que si l'efficacité énergétique des systèmes était améliorée de 40%, cela permettrait d'économiser jusqu'à 60 GW lors de pics de consommation d'ici 2030. Autrement dit, on éviterait la construction de 120 centrales de charbon de 500 MW chacune (Phadke *et al*, 2014).

Cependant, l'introduction de nouvelles technologies et techniques de climatisation présentent un nombre conséquent d'obstacles pour les pays en voie de développement, peu incités à investir dans ce type de nouvelles technologies (Sing et Sant, 2011). De nombreux pays manquent d'informations, de techniques et techniciens du froid compétents (ainsi qu'un manque de règlements de « bonne conduite ») et détiennent surtout des équipements obsolètes, non conformes et d'une efficacité énergétique moindre (UNEP, 2015). Les barrières peuvent alors être d'ordre économique (accès au financement, industrie fragmentée,...), social, institutionnel ou politique, selon les contextes et défis en jeu (IPCC, 2014).

D'autres problématiques s'ajoutent également à l'introduction des substances alternatives en remplacement du fluide frigorigène nocif. Ce fut le cas des CFC et des HCFC remplacés par le HFC, que l'on pensait représenter une bonne alternative mais qui finalement se révéla être encore plus néfaste pour le réchauffement planétaire. Les substances alternatives et leurs compositions chimiques présentent également des désavantages. C'est le cas de l'ammoniac ou les hydrocarbures qui sont connus pour être extrêmement inflammables et toxiques ainsi que du CO₂, peu performant au niveau thermodynamique (Benhadid, Benzaoui, 2012).

Enfin, certains auteurs et scientifiques ne semblent pas totalement convaincus d'une réelle réduction des impacts environnementaux des systèmes d'AC si les politiques et les restrictions concernent uniquement la composition chimique des fluides frigorigènes. Ceux-ci étant de mieux

en mieux récupérés en fin de vie. L'attention majeure devrait alors se porter principalement sur les émissions de GES associées à la consommation électrique et sur la réduction des pressions sur le réseau résultant d'une demande conséquente des climatiseurs, notamment en saison estivale (Calm, 2002). Il faut néanmoins préciser que l'efficacité énergétique des équipements s'améliore rapidement depuis quelques années dans les pays en développement (IPCC, 2014).

Un aspect encore important à préciser lorsque l'on parle d'efficacité énergétique est l'« effet rebond » bien connu dans le domaine de l'énergie, traduit par une simple constatation : quand l'efficacité énergétique accroît la demande (Schneider, 2003). De fait, certains gains environnementaux obtenus grâce à diverses techniques, technologies ou pratiques se verront annulés par l'intensification des usages. Cette théorie, à la base appliquée à l'économie, s'oppose en fait à des scénarios de type croissance verte qui prétendent qu'une meilleure performance énergétique permettrait de ralentir le changement climatique sans changer les modes de vie ou de production. Ces théories ne sont pas aussi simples d'autres facteurs entrant bien évidemment en jeu, mais elles méritaient d'être mentionnées brièvement.

Conclusion générale

Conclusion

Face à la rapide augmentation de la climatisation en Inde présentant des impacts environnementaux collatéraux conséquents, ce mémoire a examiné et tenter de caractériser l'évolution de cette tendance selon une approche multidisciplinaire associant les sciences exactes (augmentation des températures,...) et les sciences humaines. Ce travail de recherche s'est articulé autour d'une question précise : la climatisation est-elle nécessaire en Inde en tant que mesure d'adaptation au réchauffement climatique ou est-elle un désir de développement et d'affirmation d'une société émergente et en particulier une classe moyenne envieuse d'une évolution et d'une distinction sociale ? L'objectif de ce travail étant de se pencher sur une telle constatation, dans le cadre d'un effort commun de limitation du changement climatique et d'un scénario de limitation des températures en dessous des 2°C (ou même 1,5°C) par rapport aux températures de l'ère préindustrielle. Afin de répondre à la problématique, le raisonnement s'est organisé en plusieurs étapes.

Dans un premier temps, les évolutions connues et observées ont été exposées, démontrant l'ancrage du concept de « confort thermique » dans le mode de vie nord-américain mais surtout l'évolution exponentielle et flagrante dans une économie émergente comme la Chine. En effet, celle-ci a connu une évolution de moins de 1% des ménages possédant un AC en 1990 à déjà 95% en 2007 (Henley, 2015). Cela a permis de réaliser l'amplitude de l'évolution future indienne si celle-ci suit la tendance chinoise en taux d'acquisition d'air conditionné et de PIB/habitant (la situation en 2011 en Inde étant semblable à ce que vivait la Chine vers 1993).

Dans un second temps, l'étude de l'évolution économique, démographique et du phénomène d'urbanisation que vit l'Inde depuis quelques années a permis de contextualiser la tendance d'acquisition de climatiseurs dans les espaces publics et privés mais aussi d'affirmer le potentiel de l'Inde dans son développement énergétique. L'analyse du secteur résidentiel progressivement responsable des plus fortes consommations énergétiques a permis de comprendre l'évolution changeante dans les pratiques de consommation dans le domaine de la climatisation artificielle. En effet, alors qu'historiquement ce sont les ventilateurs naturels (sous forme de pâles par exemple) et les rafraichisseurs d'air qui étaient les plus courants dans les familles, le Room Air Conditionner est petit à petit préféré, contribuant déjà à une consommation électrique domestique entre 20 et 30% en 2014 (Diddi, 2014) et représentant 61% des ventes de climatiseurs en Inde²⁰.

Une troisième partie a permis de développer et d'analyser comment une *donnée physique objective qu'est la température peut renvoyer à des perceptions subjectives variables* (Pellegrino, 2013). Il a fallu dépasser l'idée selon laquelle le confort thermique résulterait uniquement d'une adaptation à son milieu environnant (chaleur, pollution, bruit,...). En effet, le climat indien étant caractérisé par des saisons à hautes températures et à forte humidité et surtout promis à subir des variations climatiques futures, il était indispensable dans un premier temps de développer la notion de

²⁰ En ligne: <http://www.cleanenergyministerial.org/News/sead-and-india-bureau-of-energy-efficiency-host-workshop-on-enhancing-space-cooling-efficiency-and-demand-response-565>,

« Degré-Jour Refroidissement », mesure essentiellement utilisée pour établir une corrélation entre la température et l'air conditionné. Les études allant dans ce sens semblent affirmer que l'Inde posséderait un nombre de DJR supérieur aux villes majeures des Etats-Unis, déjà actuellement fortement climatisées. Cependant, la définition même de cette mesure dépend d'un intervalle de confort thermique défini selon le contexte et le climat local. Or, en plus d'avoir une tendance à l'uniformisation des pratiques domestiques et de la définition des normes de confort, il a été démontré que les deux codes indiens (NBC et ECBC) se basaient en fait sur des standards internationaux et plus précisément sur l'ASHRAE aux Etats-Unis, faiblement représentatifs de la situation indienne. L'hypothèse selon laquelle la croissance de l'utilisation de la climatisation en Inde résulterait d'un réchauffement climatique n'est donc pas suffisante pour expliquer cette tendance.

C'est principalement l'analyse du phénomène d'urbanisation et d'affirmation de la classe moyenne indienne qui ont pu confirmer notre hypothèse de départ. Conséquence d'un dynamisme démographique important, de transformations sociales et économiques dans la société indienne et d'une migration des populations des zones rurales vers les zones urbaines, l'urbanisation en Inde tente à évoluer, pour atteindre les 40% de la population vivant en ville d'ici 2020, contre 28% en 2008 (Lall *et al*, 2008). Avec un total de sept mégacités prévues pour 2030 et abritant jusqu'à 10 millions d'habitants, de nouvelles infrastructures routières ou de transports en commun et de nombreux bâtiments devront être construits, accueillant toutes ces populations grandissantes et ses nombreux habitants (IPCC, 2014). Sans oublier une électrification de plus en plus accessible, l'Inde désirent augmenter sa capacité installée, notamment via les énergies renouvelables.

En outre, l'étude du développement et des attentes particulières en terme de consommations et de position sociales de la classe moyenne indienne fut centrale pour aborder et répondre à notre problématique. L'Inde vit une restructuration dans ses classes sociales qui petit à petit se déplacent et vont vers une meilleure condition de vie, les revenus augmentant, surtout dans les villes, influençant leurs pratiques de consommation et le choix de leurs dépenses. Les biens de première nécessité étant alors relégués au second plan, faisant place aux dépenses de choix, dont font partie les climatiseurs. Alors que le confort devient un bien de grande consommation, ce bien de luxe progressivement accessible que représente l'AC permettrait de se démarquer socialement, d'affirmer une position et un statut social déterminés, passant également par la possibilité d'accueillir « dignement » des invités au domicile. Car, même si la classe moyenne possède un revenu allant de 500 000 roupies indiennes à 1 million de roupies par an (entre 41 000 et 83 000 roupies par mois), un AC reste ce qu'on peut appeler un bien de « luxe », celui-ci présentant un prix minimum de 30 000 roupies... Cette nouvelle génération de consommateurs, aspirant à un modèle de vie tourné vers l'éducation et les pratiques occidentales, pourrait atteindre les 583 millions de personnes, l'équivalent de 41% de la population indienne d'ici 2025 (Pellegrino, 2013).

Bien que les scénarios imaginent que la proportion des ménages indiens utilisant l'air conditionné augmenterait de 2% actuellement à 20% en 2020 et déjà à 73% en 2030, cette croissance ne serait pas inquiétante si elle ne s'associait pas à des impacts environnementaux considérables. Ce fut donc l'objectif des chapitres suivants, permettant d'analyser plus en profondeur le volet environnemental de la tendance observée. En effet, deux grandes catégories d'impacts

environnementaux furent alors abordés : les fuites de fluides frigorigènes présentant des émissions de GES notables et la consommation électrique et énergétique nécessaire au bon fonctionnement des climatiseurs, avec pour conséquence des pics de consommations et donc des pressions sur un réseau électrique indien déjà fragilisé. Les fluides réfrigérants que sont les HFC possèdent un PRG élevé, pouvant être jusqu'à 14 000 fois plus nocifs que le CO₂. Représentant une augmentation des émissions de 10% à 15% par an, ces gaz font l'objet de nombreuses politiques d'encadrement, jusqu'à l'amendement de Kigali en 2016, imposant une limitation suivie de l'arrêt total d'utilisation de ces gaz, au profit de substances alternatives comme l'ammoniac, les hydrocarbures ou le dioxyde de carbone. Cela permettrait d'éviter jusqu'à 0,5°C de réchauffement d'ici 2100. Mais c'est surtout la consommation énergétique imputable à ces équipements qui représente un impact considérable, conséquence d'une demande énergétique à usage résidentiel prévue de passer de 8 TWh par an en 2010 à 239 TWh par an pour 2030 en Inde (LBNL, 2014), mais aussi la pression intensive que l'utilisation d'AC exerce sur le réseau électrique indien, contribuant à quasiment 60% du pic de demande d'électricité à Delhi et entraînant des black-out réguliers. Cela prouve la nécessité urgente de l'Inde à multiplier son offre énergétique primaire ainsi que sa capacité de production électrique.

Enfin, afin de réduire ces consommations énergétiques, plusieurs alternatives existent, et notamment le programme du BEE « Standards & Labels » agissant sur la performance énergétique d'un climatiseur ou la climatisation solaire en adéquation avec le projet « The National Solar Mission » ambitieux introduit par le gouvernement indien. Cependant, la problématique développée tout le long de ce mémoire donne naissance à une réflexion plus personnelle qui est celle de la faisabilité et la durabilité de ces alternatives dans un tel contexte. En effet, si l'utilisation de l'air conditionné est davantage un moyen d'élévation dans la société qu'une mesure d'adaptation au réchauffement des températures comme nombreux semblent ou veulent le penser, ce sont donc forcément des changements d'ordres sociaux qui pourront peut être à terme, limiter une telle croissance.

De ce fait, le développement de cette étude a pu, si pas démontrer, en tout cas confirmer l'idée selon laquelle le confort thermique est le résultat d'une construction sociale et technique et que sa définition même ne peut donc se passer de son analyse sociale. Le lien entre la perception de sensation de confort, de consommation énergétique et de pratiques sociales a donc été abordé selon une approche relative à la dynamique de classes sociales et à ses choix de consommation. Les défis et surtout les conséquences de l'uniformisation de cette notion ont été exposés ; l'utilisation de critères et standards en non adéquation avec le contexte local et national pouvant amener à des pratiques, des aménagements ou des constructions extrêmement énergivores.

Se pencher sur la question de la croissance de la climatisation que ce soit en Inde, ou dans les pays en développement ou émergents, selon un angle uni-disciplinaire, c'est risquer de passer à côté des aspects fondamentaux et déterminants de cette tendance, et donc de fausser et influencer toutes propositions de solutions. Car l'énergie est autant objet de science qu'objet social, intégrée dans la vie quotidienne, ... les consommations énergétiques ne peuvent s'expliquer uniquement via les relevés de consommation d'un ménage mais il est évident que, parallèlement, les choix sociaux doivent, eux aussi, être étudiés selon des données objectives (Pellegrino, 2013). La problématique ci-présente s'ancre donc totalement dans un contexte bien plus large pour la recherche contemporaine portant sur les consommations énergétiques et la pratique qui la

détermine. Le défi actuel majeur auquel il semble falloir faire face peut donc se résumer de cette façon : rester au frais, sans réchauffer la planète.

Prolongements

La problématique ci-présente ayant pour cas d'étude un pays en développement mène à s'interroger sur les fondements sociaux d'une telle tendance mais surtout à la traiter de manière la plus objective possible, sans vision occidentalisée et influencée par les modes de vie connus. C'est effectivement le cas pour une définition de la notion de « confort thermique » dans l'usage de l'air conditionné que les pays développés semblent avoir intégrée dans leurs pratiques de consommation et leurs styles de vie depuis longtemps, au contraire des pays en développement que la prise de conscience d'impacts environnementaux risque de limiter. En effet, comment permettre la croissance d'une pratique d'utilisation et un « rattrapage » des économies les plus riches tout en évitant de polluer autant qu'eux ?

La question se pose alors de savoir si l'acquisition d'un bien comme le climatiseur doit être considéré comme une nécessité ou même un « droit » à accorder à ces pays en développement (que ce soit comme mesure d'adaptation au réchauffement des températures, pour son effet sur la santé (alimentaire ou médicale), pour une meilleure productivité ou tout simplement pour une sensation de bien-être légitime désirée par les populations) ou comme une véritable envie de possession calquée sur les modes de vie occidentaux ou en tout cas connus et transmis via un phénomène bien connu qu'est la mondialisation.

Ce débat n'est pas nouveau, mais il semble opportun de brièvement se porter sur les alternatives et leurs possibles applications et efficacités afin d'en encadrer l'évolution le mieux possible. En effet, les solutions proposées semblent toutes se tourner vers une limitation efficace des impacts environnementaux par des systèmes de climatisation plus efficaces, la climatisation active, soit par des interventions que l'on appelle « low cost » ou « climatisation passive ». Celle-ci s'apparente à des mesures à « taille humaine » accessibles à tout un chacun pouvant réduire drastiquement les consommations d'énergie liées à l'utilisation de climatiseurs.

C'est dans une optique similaire mais surtout tournée vers un changement de pratiques « sociales » que le programme « Cool Biz » fut introduit en 2005 par le gouvernement japonais. La climatisation des immeubles consommant trop d'énergie, les multinationales japonaises ont décidé de réduire l'utilisation de la climatisation dans les bureaux, la température se maintenant alors à 28°C en été. Afin de rendre cela plus tenable pour les employés, le programme allège le code vestimentaire d'ordinaire très strict et permet aux hommes d'affaire de se rendre au travail sans cravate (Grignon Massé, 2010 ; Sing et Sant, 2011).

Malgré ces quelques alternatives toutes visant un angle d'approche spécifié, la réflexion porte également sur leur réelle application. En effet, l'air conditionné semble être surtout un moyen d'affirmation de position sociale et de désir de distinction dans la société indienne que les solutions techniques moins énergivores et plus soutenables d'air conditionné ne changera jamais. En outre, le rapport d'expertise scientifique de l'IPCC affirme qu'en plus de technologies efficaces ou d'aménagements architecturaux, ce sont d'abord les comportements et les styles de vie qui représentent les moteurs majeurs en termes de consommation énergétique dans le secteur

du bâtiment résidentiel (IPCC, 2014). A titre d'exemple, dans les pays développés, il est prouvé que les comportements dits « éclairés » par la conscience de problèmes énergétiques et climatiques pourraient réduire jusqu'à 20% les effets néfastes à court terme et jusqu'à 50% d'ici 2050. Serait-ce donc dans une optique plutôt de conscientisation ou de sensibilisation que les efforts sont à faire ? Et est-ce envisageable dans des pays en développement qui aspirent à ressembler au modèle occidental, quel qu'en soit le prix sur l'environnement ?

Limites méthodologiques

Durant la phase de recherche mais aussi de rédaction de ce mémoire, plusieurs difficultés et limites inhérentes à la démarche scientifique sont apparues.

La démarche restant bibliographique, les sources sont en effet à analyser de manière critique. Les sources internet ou la littérature grise doivent être traitées avec prudence, et les articles scientifiques comparés entre eux, les données n'étant pas toujours semblables. La problématique fut abordée de manière la plus systémique possible, cependant ce mémoire n'est aucunement exhaustif. Le marché des climatiseurs en Inde étant observé depuis quelques années seulement, certaines études ou informations ont été compliquées à rassembler car certaines relevaient de la confidentialité. Il a fallu alors limiter les recherches, l'ensemble des acteurs, les zones géographiques, les contextes ou angles d'approche ne pouvant pas tous être considérés.

Autre point important : les collectes de données auraient pu être étayées par une enquête de terrain et des témoignages réels. Des prises de contacts sur place ont été tentées (guide connu au Rajasthan lors d'un voyage, contacts de certaines connaissances ayant des liens de près ou de loin sur place,...) via des contacts téléphoniques ou courriers électroniques, mais sans réels succès en tout cas pertinents pour notre problématique, mis à part quelques échanges avec des scientifiques spécialistes du domaine.

Par ailleurs, les scénarios de projection repris dans ce mémoire diffèrent entre eux selon que les auteurs mobilisent des données macroéconomiques ou des données microéconomiques qui prennent en compte les comportements individuels, les ménages par exemple, ou des variables socioéconomiques, géographiques, le coût de l'électricité, etc. A titre d'exemple, certaines estimations du marché futur de l'AC sont réalisées selon les ventes actuelles et les données de croissance des ventes extrapolées, mais ne tiennent pas toujours compte de certaines données, ce qui les rend donc contestables.

De plus, ces estimations se basent généralement sur des scénarios de variations climatiques et d'émissions futures différents. Les résultats de projections en lien avec la croissance de l'AC et ses effets sur l'environnement diffèrent que les chercheurs considèrent un scénario de type Business as Usual (BaU) dans lequel les émissions continuent de croître au rythme actuel, ou qu'ils imaginent un scénario dans lesquels des mesures d'atténuation des émissions de GES limiteraient l'augmentation des températures à 2°C d'ici la fin du siècle par rapport à l'ère pré-industrielle ou encore l'éventualité d'autres types de scénarios (Van Vuuren et Isaac, 2009). Les

chiffres avancés doivent donc être pris avec précaution, intégrant la possibilité d'éléments manquants.

Enfin, les impacts environnementaux les plus problématiques ont été développés (consommation énergétique et relâchement de fluides frigorigènes). Cependant, l'empreinte carbone totale d'un système d'air conditionné aurait pu être analysée via une Analyse de Cycle de Vie (ACV) afin de considérer les émissions directes, indirectes et les émissions associées à chaque étape de la vie d'un climatiseur (transport, recyclage,...). Cela pourrait faire l'objet de toute une étude mais le thème de la climatisation étant large et complexe, il a fallu faire des choix sur les types d'approches et cibler les informations pertinentes à notre analyse.

Pour finir, ce marché des climatiseurs étant en constante évolution, les données ci-présentes risquent d'être rapidement dépassées et dès lors d'application uniquement dans un futur à court ou moyen terme.

Bibliographie

ABLETT, J. BAIJAL, A., BEINHOCKER, E., BOSE, A., FARREL, D., GERSCH, U. & GUPTA, S. (2007). The « bird of gold » : The rise of India's consumer market. *McKinsey Global Institute*, 79.

Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME). (2015). Garder son logement frais en été, chaud dehors, frais dedans. *Guide pratique*. EN LIGNE : http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/15-05_7351_garder_logement_frais_en_ete.pdf, consulté le 18 mai 2017.

AHN, S. J., & GRACZYK, D. (2012). Understanding energy challenges in India: policies, players and issues. *International Energy Agency*, 1, 116p.

AKPINAR-FERRAND,E. & SINGH, A. (2010). Modeling increased demand of energy for air conditioners and consequent CO2 emissions to minimize health risks due to climate change in India. *Environmental science & policy*, 13 (8), pp.702-712.

AUFFHAMMER, M. (2014). Cooling China : The weather dependence of air conditioner adoption. *Frontiers of Economics in China*, 9(1), pp. 70-84.

AUFFHAMMER, M., MANSUR, E.T. (2014). Measuring climatic impacts on energy consumption : a review of the empirical literature, *Energy Economics*, 46, pp. 522-530.

AEBISCHER B., CATENAZZI G., JAKOB M. (2007), Impact of climate change on thermal comfort, heating and cooling energy demand in Europe, in *Eceee*, EN LIGNE : <file:///Users/inextremispousset/Downloads/ImpactClimateChange.pdf>, consulté le 3 mai 2017.

ALLAIRE J. (2007). L'impact du développement urbain en Chine sur le réchauffement climatique, *Perspectives chinoises*, 2007/1. EN LIGNE <http://perspectiveschinoises.revues.org/1953#quotation>, consulté le 5 janvier, 2017.

BEEREPOOT, M., TAM, C., PHILIBERT, C., & FRANKL,P. (2012). Technology roadmap solar heating and cooling. *International Energy Agency (IEA) : Paris, France*.

BENHADID-DIB S., BENZAOUI A. (2012). Refrigerants and their environmental impact Substitution of hydro chlorofluorocarbon HCFC and HFC hydro fluorocarbon. Search for an adequate refrigerant, in *Energy Procedia*, 18, pp. 807-816.

BEINHOCKER, E. & FARELL, D. (2007). Next big spenders: India's middle class. *Business Week*. 19.

BEINHOCKER, E.D. FARREL, D., & ZAINULBHAI, A.S. (2007). Tracking the growth of India's middle class. *McKinsey Quarterly*, 3, 50.

BESHR, M., AUTE, V., ABDELAZIZ, O., FRICKE, B., & RADERMACHER, R. (2017). Potential emission savings from refrigeration and air conditioning systems by using low GWP refrigerants. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(5), pp.675-682.

BIDDLE, J. (2008). Explaining the spread of residential air conditioning, 1955-1980. *Exploring in Economic History*, 45(4), pp. 402-423.

BRISEPIERRE,G. (2013). Analyse sociologique de la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires-Bilan et perspectives. *ADEME : Paris, France*, 51.

- CALM, J.M. (2002). Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration*, 25(3), pp.293-305.
- CANTAT, O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (191), pp. 75-102.
- CAPPELLIN O. (2013). Les fluides frigorigènes et les équipements frigorifiques : réglementation. La Cellule des Conseillers en Environnement (CCE) & l'Union wallonne des entreprises (UWE), Bastogne.
- Cellule des Conseillers en Environnement- Cappellin Olivier, *Les fluides frigorigènes et les équipements frigorifiques : réglementation*, Union Wallonne des entreprises (UWE), Bastogne, 2013
- Center for Science and Environment (CSE) (2015). CSE analysis of Delhi's power consumption paints a dark picture. EN LIGNE : <http://www.cseindia.org/content/cse-analysis-delhis-power-consumption-paints-a-dark-picture>, consulté le 7 avril 2017.
- Center for Sciences and Environment (CSE) (2016). Not as cool. Improving energy performance of air conditioners in India, 22p.
- Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). (2014). L'énergie solaire dans le monde. *CNRS Journal*, EN LIGNE : <https://lejournel.cnr.fr/infographies/lenergie-solaire-dans-le-monde-les-chiffres>, consulté le 3 août 2017.
- CHAPPELLS, H., & SHOVE, E. (2003, June). The environment and the home. In *Paper for Environment and Human Behaviour Seminar, Policy Studies Institute : London*.
- CHAPPELLS, H., & SHOVE, E. (2005). Debating the future of comfort : environmental sustainability, energy consumption and the indoor environment , *Building Research & Information*, 33(1), pp. 32-40
- CHAPPOZ, L. & LAPONCHE, B. (2013). Les politiques d'efficacité énergétique en Chine, Inde, Indonésie, Thaïlande et Vietnam. Agence Française de Développement (AFD), Département de la recherche, Document de travail n°133, 149p.
- CHAUVIN, S., & LEMOINE, F. (2004). *L'économie indienne en bonne voie*. Editions la Découverte, collection Repères, Paris, 2004, pp. 70-83
- CHATURVEDI, V., & SHARMA, M. (2016). Modelling long-term HFC emissions from India's residential air-conditioning sector : exploring implications of alternative refrigerants, best practices, and a sustainable lifestyle within an integrated assessment modelling framework. *Climate Policy*, 16(7), 877-893.
- CHEILAN R., La climatisation solaire Rapport de projet de fin d'études, sous la direction de M. Viennet, Ecole nationale d'ingénieurs de Saint-Etienne (ENISE), 2004.
- CLODIC, D., XUEQIN, P.E., DEVIN, E., MICHINEAU. (2013). Alternatives aux HFC à fort GWP dans les applications de réfrigération et de climatisation, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), 133p.
- Council on Energy, Environment and Water (CEEW), Natural Resource Defence Council (NRDC). (2014). *Air conditioners with Hydrocarbon Refrigerant- Saving Energy while saving money*. EN LIGNE : <http://ceew.in/pdf/ceew-nrdc-godrej-profile-5nov14.pdf>, consulté le 14 juin 2017.

DAHIYA R.P, GARG H.P, KADIAN R. (2007). Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi, in *Energy policy*, 35, pp. 6195-6211

DAVIS L.W., GERTLER P.J. (2014). Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming, *The Proceedings of the National Academy of Science*, 112(19), pp.5962-5967.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2012). *Garder son sang froid. Refroidissement- Croissance- Changement Climatique*. Mandaté par Ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement et le Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité nucléaire. EN LIGNE <https://www.giz.de/expertise/downloads/giz2012-0103fr-brochure-garder-son-sang-froid.pdf>, consulté le 23 novembre 2016.

Développement durable, Environnement et lutte contre les changements climatiques-Québec, *Les Halocarbures : une réglementation environnementale pour mieux encadrer la gestion des halocarbures*, EN LIGNE : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/halocarbures/>, consulté le 30 mars 2017.

DEWACHTER Kevin, Les nouvelles tendances d'une Inde émergente. Analyse de la classe moyenne et de l'industrie cosmétique en vue d'une stratégie marketing adaptée. Université Catholique de Louvain (UCL), en vue de l'obtention du titre de Master en Ingénieur de Gestion. Année académique 2014-2015.

DIDDI S. (2014). India AC efficiency Policy opportunities & Current Activities. Workshop on « Space cooling efficiency enhancement and demand response », Bureau of Energy Efficiency (BEE), EN LIGNE : <https://www.beeindia.gov.in/sites/default/files/ctools/Mr%20Saurabh%20Didi%20Space%20Cooling%20India.pdf>, consulté le 5 juillet 2017, consulté le 17 juin 2017.

Environmental Investigation Agency (EIA). *Kigali Amendment to the Montreal protocol : A crucial step in the fight against catastrophic Climate Change*. EIA briefing to the 22nd Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). November 7-18, 2016. EN LIGNE : <https://eia-international.org/wp-content/uploads/EIA-Kigali-Amendment-to-the-Montreal-Protocol-FINAL.pdf>, consulté le 1 août 2017.

FARREL, D. & BEINHOCKER, E. (2007). Next big spenders : India's middle class. *Business Week*, 28 , EN LIGNE : <http://www.mckinsey.com/mgi/overview/in-the-news/next-big-spenders-indian-middle-class>, consulté en juillet 2017.

FILIPPINI M., PACHAURI S., (2004), Elasticities of electricity demand in urban Indian Households, in *Energy Policy*, 32 pp.429-436

FUNG W.Y, LAM K.S, HUNG W.T, PANG S.W, LEE Y.L (2006), Impact of urban temperature on energy consumption of Hong Kong, in *Energy, Elsevier*, 31, pp. 2623-2637.

GERTLER P., SHELEF O., WOLFRAM C. (2012), How will Energy demand develop in the developing World ? *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), pp. 119-138.

GOVERNMENT OF INDIA. Cabinet. (2015, 17 Juin). *Revision of cumulative targets under National Solar Mission from 20,000 MW by 2021-22 to 1,00,000 MW. India surging ahead in the field of Green Energy - 100 GW Solar Scale-Up plan*. [Press information]. Consulté le EN LIGNE <http://pib.nic.in/newsite/PrintRelease.aspx?relid=122566>

GRIGNON-MASSE, L. (2010). *Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été: cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine*, Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

GUIGNARD, A., J-M, TIMMERMANS. (2005). « couts financiers directs et indirects engendrés par l'installation de système d'air climatisé dans les voitures particulières »-Rapport final. EN LIGNE <http://www.ulb.ac.be/ceese/nouveau%20site%20ceese/documents/Airco.pdf>, consulté le 15 mars 2017.

GUIVARCH, C., MATHY, S. (2012). Energy-GDP decoupling in a second best world-a case study on India, *Climatic Change*, 113 (2), pp. 339-356.

GUPTA, R., SANKHE, S., & SARMA, S. (2009). Environmental and energy sustainability : an approach for India. *McKinsey and Company*.

HAN, J., YANG, W., ZHOU, J., ZHANG, G., ZHANG, Q., & MOSCHANDREAS, D. J. (2009). A comparative analysis of urban and rural residential thermal comfort under natural ventilation environment. *Energy and Buildings*, 41(2), 139-145.

HENDERSON G. (2005), Home air conditioning in Europe- how much energy would we use if we became more like American households ?, in *Eceee*. EN LIGNE : http://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2005c/Panel_2/2246henderson/paper, consulté le 18 décembre 2016.

HENLEY J. (2015). World set to use more energy for cooling than heating. *The Guardian*, EN LIGNE <https://www.theguardian.com/environment/2015/oct/26/cold-economy-cop21-global-warming-carbon-emissions>, consulté le 9 juin 2017.

Institute for Governance & Sustainable Development (IGSD) (2015, 7 avril). *Improving India's Room air conditioners provides powerful Climate Protection*. EN LIGNE : <http://www.igsd.org/improving-indias-room-air-conditioners-provides-powerful-climate-protection/>, consulté le 14 mai 2017.

Institute for Governance & Sustainable Development (IGSD) (2013, 7 octobre). *Climat : les HFC dans le collimateur du protocole de Montréal*. EN LIGNE : <http://www.igsd.org/climat-les-hfc-dans-le-collimateur-du-protocole-de-montreal/>, consulté le 10 avril 2017.

Institute for Governance & Sustainable Development (IGSD) (2016, 31 mai). *The Washington Post : the world is about to install 700 million air conditioners. Here's what that means for the climate*, EN LIGNE : <http://www.igsd.org/the-washington-post-the-world-is-about-to-install-700-million-air-conditioners-heres-what-that-means-for-the-climate/>, consulté le 4 septembre 2016.

Institute for Governance & Sustainable Development (IGSD) (2015, novembre). *HFCs : Summary and Fact sheet*. EN LIGNE : http://www.igsd.org/hfcs_summary_fact-sheet/, consulté le 15 avril 2017.

Institute for Governance & Sustainable Development (IGSD) (2012, 23 septembre). *How to make Air conditioners Less Guzzling and more green*. EN LIGNE : <http://www.igsd.org/how-to-make-air-conditioners-less-guzzling-and-more-green/>, consulté le 16 juillet 2017.

INDRAGANTI, M. (2010). Adaptive use of natural ventilation for thermal comfort in Indian apartments. *Building and environment*, 45(6), pp.1490-1507.

Institut international du froid (IIF). *Développement durable : progrès et défis du froid*. 2003. EN LIGNE http://www.iifir.org/userfiles/file/webfiles/in-depth_files/Sustainable_devt_Johannesburg_FR.pdf, consulté le 7 janvier 2017.

Institut international du froid (IIF). *Le rôle du froid dans l'alimentation mondiale : 5ème Note d'information sur le froid et l'alimentation*. France, 2009. EN LIGNE <http://www.iifir.org/medias/medias.aspx>, consulté le 8 janvier 2017.

Institut international du froid (IIF). *29ème Note d'information sur les technologies du froid. Le rôle du froid dans l'économie mondiale*. France, 2015.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2014 : Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I,II and III to the Fifth Assesment Report of the Intergouvernemental Panel on Climate Change (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)). IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

ISAAC, M. & VAN VUUREN, D.P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy policy*, 37(2), pp.507-521.

Indian Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ISHRAE) 2015, Air Conditioner, EN LIGNE <http://ishrae.in/newsdetails/Air-Conditioner-Market-in-India/338>, consulté en juin 2017.

IZQUIERDO M., MORENO-RODRIGUEZ A., GONZALEZ-GIL A., GARCIA-HERNANDO N. (2011). Air conditioning in the region of Madrid, Spain : an approach to electricity consumption, economics and CO2 emissions, *Energy*, 6(3), pp. 1630-1639.

JAGLIN, S. & VERDEIL, E. (2013). Energie et villes des pays émergents : des transitions en question. Introduction. *Flux*, 3, pp.7-18.

JAISWAL, A. (2015). Reducing Stress on India's Energy Grid – Issue Brief. Natural Resource Defence Council (NRDC), Institute for Governance & Sustainable Development (IGSD), and the Council on Energy, Environment and Water (CEEW). EN LIGNE <https://www.nrdc.org/sites/default/files/india-energy-grid-alternative-refrigerants-IB.pdf>, Consulté le 27 juillet 2017.

KADIAN, R., DAHIYA, R.P., & GARG, H.P. (2007). Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi. *Energy Policy*, 35 (12), pp.6195-6211.

KHARAS, H. (2010). The emerging middle class in developing countries. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Working paper No. 285

KHALFALLAH, E, MISSAOUI, R, El KHAMLICHI, S et H, BEN HASSIM. (2016). L'efficacité énergétique de la climatisation: le cas du Maghreb Des opportunités pour un marché plus efficient. *Mena Energy Series. Report n°105360-MNA*. EN LIGNE <http://documents.worldbank.org/curated/en/352241472472218258/pdf/105360-REVISED-PUBLIC-MENA-Digital-Print-FRENCH-sep-2016.pdf>, consulté le 14 juillet 2017.

KAUFFIELD, M. (2012). Availability of low GWP alternatives to HFCs feasibility of an early phase-out of HFCs by 2020. *Environmental Investigation Agency*.

- KHARAS, H. & GERTZ, G. (2010). The new global middle class : A cross-over from West to East. *Wolfensohn Center for Development at Brookings*, pp.1-14.
- KERSCHNER, E.W., & N. HUQ (2011) Asian Affluence: The Emerging 21st Century Middle Class. Morgan Stanley Smith Barney.
- KIM, D.S., & FERREIRA, C.I. (2008). Solar refrigeration options- a state-of-the-art review. *International Journal of refrigeration*, 31(1)-pp.3-15.
- KOIZUMI, S. (2007). Energy Efficiency of air conditioners in developing countries and the role of CDM. Paris: *International Energy Agency (IEA)*. EN LIGNE : https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Energy_Efficiency_Air_Conditioners.pdf, consulté le 1 août 2017.
- Kumar, K. S., & Viswanathan, B. (2013). Household level pollution in India: patterns and projections. *Climate and Development*, 5(4), 288-304.
- LALL, A. B., & PARAKH, R. (2008). Preventive strategy for air conditioning—a case for India. *Proceedings of Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*. Windsor, UK.
- LEE, T. C., KOK, M. H., & CHAN, K. Y. (2010). Climatic influences on the energy consumption in domestic and commercial sectors in Hong Kong. In *16th Annual International Sustainable Development Research Conference, May 30 to June 1, 2010, Hong Kong*.
- Les cahiers de Global Chance. (2012). N°32. *L'efficacité énergétique à travers le monde. Sur le chemin de la transition – Partie IV* (Daljit SING et Girish SANT (2011). Inde: définir une stratégie pour les appareils électriques commerciaux et domestiques. EN LIGNE: <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC32p155-161.pdf>). Passerelle N°8. EN LIGNE : <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC32.pdf>, Consulté le 7 juillet 2017.
- LEBRETON R. (2005). Les fluides frigorigènes- aide mémoire technique. Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). EN LIGNE : <file:///Users/inextremispousset/Downloads/ed969.pdf>, consulté le 13 avril 2017.
- Le Réseau de l'Intelligence Electrique (RIE). (2015). Statistiques de l'électricité en France. Bilan définitif de l'année 2015. EN LIGNE : http://www.rte-france.com/sites/default/files/presentation_des_seef_2015.pdf, consulté le 15 juillet 2017.
- LETSCHERT, V. (2010). The boom of electricity demand in the residential sector in the developing world and the potential for energy efficiency. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- LETSCHERT, V., McNEIL, A.M. (2005), Forecasting electricity demand in developing countries : A study of household income and appliance ownership, in *Eceee*, EN LIGNE : http://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2005c/Panel_6/6259mcneil/paper, consulté le 13 juillet 2017.
- LETSCHERT, V., McNEIL A. M. (2007), Coping with residential electricity demand in India's future- How much can efficiency achieve ? *ECEEE Summer Study*. Panel 5 ; Energy efficient buildings, pp.1027-1037
- LETSCHERT, V., McNEIL M.A. (2008). Future air conditioning energy consumption in developing countries and what can be done about it : the potentiel of efficiency in the residential sector, *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

LEVY, J.P., ROUDIL, N., FLAMAND, A., & BELAID, F. (2014). Les déterminants de la consommation énergétique domestique. *Flux*, (2), pp. 40-54.

Lucon O., D. Ürge-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L.F. Cabeza, N. Eyre, A. Gadgil, L.D.D. Harvey, Y. Jiang, E. Liphoto, S. Mirasgedis, S. Murakami, J. Parikh, C. Pyke, and M.V. Vilarinho, 2014: Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

MAHLIA T.M.I, MASJUKI H.H, SAIDUR R., AMALINA M.A (2004), Viewpoint ; Mitigation of emissions through energy efficiency standards for room air conditioners in Malaysia, in *Energy Policy*, 32, pp. 1783-1787.

MARESCA, B., DUJIN, A., & Picard, R. (2009). *La consommation d'énergie dans l'habitat entre recherche de confort et impératif écologique*. CREDOC. EN LIGNE : <http://www.credoc.fr/pdf/Rech/C264.pdf>, consulté le 14 juin 2017.

MATHUR, N. (2010). Shopping malls, credit cards and global brands : consumer culture and lifestyle of India's new middle class. *South Asia Research*, 30(3), pp.211-231.

MATHY S. (2013). Le positionnement de l'Inde sur le changement climatique : des négociations internationales aux politiques nationales : des relations ambivalentes. *Asia centre*, note programme gouvernance globale, EN LIGNE :

http://www.centreasia.eu/sites/default/files/publications_pdf/asiacentre_note_positionnement_inde_changement_climatique_decembre2013.pdf, consulté le 6 mars 2017.

MATHY S., L'intégration des pays en développement dans les politiques climatiques ; Application aux secteurs de l'électricité et des transports en Inde, Thèse pour l'obtention du titre de Docteur de l'EHESP en Economie de l'Environnement, sous la direction de Hourcade J-M, Ecole des hautes études en Sciences sociales, 2004.

MAZZUCCHI N. (2015), Différenciations territoriales et insertion dans la mondialisation : le cas de l'énergie en Inde, *EchoGéo*, (32).

MEUNIER, F., & MUGNIER, D. (2013). *La climatisation solaire: thermique ou photovoltaïque*. Dunod.

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. Chiffres clés du climat France et Monde – Édition 2017. Datalab n°4 - Novembre 2016. Baude, M. Dussud, F-X. Ecoiffer, M. Duvernoy, J. Vailles, C. EN LIGNE : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2016/chiffres-cles-du-climat-edition2017-2016-12-05-fr.pdf, consulté le 14 mai 2017.

Ministry of Environment, Forest and Climate Change, *Roundtable Discussion on Phasing down HFCs in India : Road to the HFC Amendment to the Montréal Protocol*. Summary Report, 26 septembre 2016. EN LIGNE : http://ceew.in/pdf/CEEW_NRDC_MOEFCC_Summary%20report%20of%20HFC%20workshop_3OCT16.pdf, consulté le 15 juin 2017.

MOUTON G. (1991), Les réfrigérants fluorocarbonés et l'environnement, *International Journal of Refrigeration*, 14(4) pp. 209-216.

Ministry of New and Renewable Energy, Government of India, 30/6/2015 (MNRE 2015b). *State wise and year wise targets for installation of 40,000 MWp Grid Connected Solar rooftop Systems*, Ministry of New and Renewable Energy, Government of India, New Delhi, EN LIGNE : <http://mnre.gov.in/file-manager/UserFiles/State-wise-and-year-wise-target-forinstallation-of-40000MWp-GCRT-systems.pdf>, consulté le 14 janvier 2017.

NARASIMHA MURTHY K.V, SUMITHRA G., REDDY.A (2001), End-uses of electricity in households of Karnataka state, India, *Energy for sustainable development*, 4(3), pp. 81-94

NICOL, J.F., & HUMPHREYS, M.A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings*, 34(6), pp. 563-572.

PACHAURI S., MUELLER A., KEMMLER A., & SPRENG D. (2004). On measuring Energy poverty in Indian Households, *World Development, Elsevier*, 32(12), pp. 2038-2104.

Padigal B., Panwar T.S, Choudhury P., Palakshappa R., Ghosh A., Mukhopadhyay S. (2014). Renewables beyond electricity. Solar Air conditioning & Desalination in India. CEEW, WWF-India, 108p.

PALAKSHAPPA, R. (2013). Cooling India with Less Warming : The Business Case for Phasing-Down HFC's in Room and Vehicle Air Conditioners, Council on Energy, Environment and Water. *Natural Resources Defense Council*.

PANDVE, H. T. (2009). India's National Action Plan on Climate Change. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 13(1), pp. 17-19

PAPILLON, P. (2012). Plateforme technologique de l'AIE. Atelier « Solaire thermique ». Institut National de l'énergie Solaire. EN LIGNE <https://www.iea.org/media/technologyplatform/workshops/solarenergyinmoroccooriental/PhilippePapillon.pdf>, consulté le 5 août 2017.

PAUGAM, A, RIBERA, T, TUBIANA, L et PACHAURI, R, K. (2015). Regards sur la terre 2015. Construire un monde durable. Chapitre 4-Sobriété énergétique et croissance inclusive : l'Inde en quête d'un développement durable.

PARK, H. (2013). Le design dans le transport en commun, vers une climatisation soutenable. Mémoire en Design et environnement, sous la direction de P-D Huyghe, Université de Paris Panthéo- Sorbonne, 2013.

PAVLOVA A.A, SAILOR D.J. (2003), Air conditioning market saturation and long-term response of residential cooling energy demand to climate change, *Energy*, 28, pp.941-951

PECIULYTE, J. (2013), Former des espaces climatisés soutenables, *Art et histoire de l'art*, 132p.

PELLEGRINO M. (2013). La consommation énergétique à Calcutta (Inde) : du confort thermique aux statuts sociaux, *Vertigo La revue électronique en sciences de l'environnement*, 13(1).

PELLEGRINO, M., SIMONETTI, M., & CHIESA, G. (2015). Climate-responsive residential buildings in India. Just a drop in the ocean ?. In *9th International Conference on Urban Climate, 20-24 juillet 2015, Toulouse*.

PELLEGRINO M, SIMONETTI M, & CHIESA G. (2016), Reducing thermal discomfort and energy consumption of Indian residential buildings : Model validation by in-field measurements and simulation of low-cost interventions, *Energy and Buildings*, 113, pp. 145-158

PETERSON D. (2015). India likely to experience continued growth in electricity use for air conditioning. U.S Energy Information Administration (EIA). EN LIGNE : <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=23512>, consulté le 15 juin 2017.

PEZZINI, M. (2012). An emerging middle class. En ligne www.oecdobserver.org/news/fullstory.php/aid/3681/An_emerging_middle_class.html, consulté le 22 juin 2015.

PHADKE, A., ABHYANKAR, N., & SHAH, N. (2014). Avoiding 100 new power plants by increasing efficiency of room air conditioners in India: opportunities and challenges (No. LBNL-6674E). Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (US).

PHILIBERT, C. (2006). Barriers to technology diffusion: the case of solar thermal technologies. *International Energy Agency, Organisations for Economic and Development*.

PREK, M. (2004). Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study, *Energy and Buildings*, 36(10), pp.1021-1027.

PUROHIT, P., HOGLUND ISAKSSON, L., BERTOK, I., CHATURVEDI, V., & SHARMA, M. (2016). Scenario Analysis for HFC Emissions in India: Mitigation potential and costs, 62p.

QUERCI J et al. (2015). Le monde indien : populations et espaces. Les système urbain indien : une construction ancienne en changement rapide. Géo-confluences, EN LIGNE : <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-regionaux/le-monde-indien-populations-et-espaces/corpus-documentaire/le-systeme-urbain-indien-une-construction-ancienne-en-changement-rapide>, consulté le 19 juin 2017.

QUITTE J-M, MAIRE R. (2011), Chine-Inde : course au développement et impacts socio-environnementaux, *Les Cahiers d'Outre-mer*, 253-254, pp. 233-268

RAPSON D. (2011), Durable Goods and Long-Run Electricity Demand : A case study of Air conditioner purchase behavior, *Journal of Environmental Economics and Management*, 68(1), pp. 141-160.

ROGERS, J., & SUPHACHASALAI, S. (2008). Residential Consumption of Electricity in India : Documentation of Data and Methodology. *The World Bank*.

ROSS A. (2012). Article Technique : une importante source de GES, les appareils de réfrigération et climatisation domestique en fin de vie, *Vecteur environnement*.

SAILOR, D., PAVLOVA, A.A.(2003). Air conditioning market saturation and long-term response of residential cooling energy demand to climate change. *Energy*, 28(9), pp.941–51.

SANKHE, S., VITTAL, I., DOBBS, R., MOHAN, A., & GULATI, A. (2010). India's urban awakening: Building inclusive cities sustaining economic growth, *McKinsey & Company*

SCHEIDER, F. (2003). L'effet rebond. *L'écologiste*, 4(3), p.45.

SHAH N., WEI M., LETSCHERT V., PHADKE A. (2015), Benefits of Leapfrogging to superefficiency and low global warming potential refrigerants in room air conditioning, in *U.S Department of Energy, Lawrence Berkeley National Laboratory Contract*.

SHOVE, E., CHAPPELLES, H., LUTZENHISER, L., & HACKETT, B. (2008). Comfort in a lower carbon society, *Building Research & Information*, 36 (4), pp. 307-311

SIVAK, M. (2009). Potential energy demand for cooling in the 50 largest metropolitan areas of the world : Implications for developing countries, *Energy policy*, 37(4), pp.1382-1384.

SIVAK M. (2013). Will AC put a chill on the global energy supply?, in *The American scientist Research Society*, vol.101, EN LIGNE : <http://www.americanscientist.org/libraries/documents/20130806110835pv27o6tcbq/2013861151359873-2013-09MacroSivak.pdf>, consulté le 6 mars 2017.

SUBIN, R. (2011). Country : India's cold chain industry. *Indo-American Chamber of Commerce*, EN LIGNE : https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32919190/Indias_Cold_Chain_Industry.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1502020249&Signature=ocZ9tutiCXLahlofSmnJ3ZYJaXQ%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DIndias_Cold_Chain_Industry.pdf, consulté le 8 juillet 2017.

SUBREMON, H. (2011). *Anthropologie des usages de l'énergie dans l'habitat, un état des lieux*. (PUCA). Collection « Recherches », France, 70p.

TIWARI, P. (2000). Architectural, demographic, and economic causes of electricity consumption in Bombay. *Journal of Policy Modeling*, 22(1), pp.81-98.

THOMAS, L. E., DE DEAR, R., RAWAL, R., LALL, A., & THOMAS, P. (2010). Air conditioning, comfort and energy in india's commercial building sector. In *Windsor Conference on Thermal Comfort*. Network for Comfort and Energy Use in Buildings (NCEUB).

United Nations Environment Programm (UNEP). (2010). Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC). 2010 Assesment. EN LIGNE <http://www.epa.ie/pubs/advice/air/ods/RTOC-Assessment-report-2010.pdf>, consulté le 17 mars 2017.

United Nations Environment Programm (UNEP) (2014), *Les bonnes pratiques en matière de climatisation individuelle, sécurité liée à l'utilisation des fluides frigorigènes*. EN LIGNE :

<http://www.unep.org/ozonaction/Portals/105/documents/events/MOP26/Les%20bonnes%20pratiques%20low%20resolution.pdf>

United Nations Environment Programm (UNEP). (2015). *Les normes internationales en réfrigération et en climatisation : présentation de leur rôle dans le contexte de l'élimination des HCFC dans les pays en développement*. EN LIGNE : http://www.unep.org/ozonaction/Portals/105/documents/Ozone_Day_2015/7739-f-StandardsBooklet2015.pdf

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352).

Ou United Nations. (2014). *World Urbanization Prospects : hightlights*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, New York.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), *Protocole de Kyoto, Résumé*, EN LIGNE :

http://unfccc.int/portal_francophone/essential_background/feeling_the_heat/items/3294.php , consulté le 15 mars 2017.

U.S Energy Information Administration (EIA). (2011). Air conditioning in nearly 100 million U.S. homes. Residential Energy Consumption Survey (RECS). EN LIGNE : <https://www.eia.gov/consumption/residential/reports/2009/air-conditioning.php>, consulté le 15 mai 2017.

US. Energy Information Administration (EIA). (2016). Country Analysis Brief: India. EN LIGNE <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/india.pdf>, consulté le 3 août 2017.

QUITTE, J.M, & MAIRE, R. (2011). Chine-Inde : course au développement et impacts socio-environnementaux. *Les cahiers d'Outre Mer*, (1), pp. 233-268.

VARMA K.P. (2009). *La classe moyenne en Inde, naissance d'une nouvelle caste*. Questions de société, France, Actes sud, 320p.

VELDERS, G.J., FAHEY, D.W, DANIEL, J.S., McFARLAND, M., & ANDERSEN, S.O. (2009). The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(27), pp. 10949-10954.

VELDERS G.J., FAHEY D.W., DANIEL J.S. *et al.* (2015). Future atmospheric abundances and climate forcings from scenarios of global and regional HFCs emissions. *Factsheet*, pp.1-2.

WALDRON M. (2017). Energy is at the heart of India's transformation. International Energy Agency (IEA). EN LIGNE : <https://www.iea.org/newsroom/news/2017/april/commentary-energy-is-at-the-heart-of-indias-transformation.html>, consulté le 23 mai 2017.

WILSON, W.T. (2013). Hitting the Sweet Spot : The growth of the middle class in emerging markets. *London : Ernst and Young*.

ZAELKE D., BORGORD-PARNELL N., ANDERSEN O.S. (2017). Primer on HFCs. Fast action under the Montreal Protocol can limit growth of hydrofluorocarbons (HFCs), prevent 100 to 200 billion tonnes of CO₂-eq by 2050, and avoid up to 0.5°C of warming by 2100. Institute for Governance & Sustainable Development (IGSD), *Working Paper*.

ZAELKE D., PICCOLOTTI R. (2015), Giving the cold shoulder to wasteful air conditioners, in *Institute for Governance & Sustainable Development* (IGSD). EN LIGNE : <http://www.igsd.org/the-washington-post-the-world-is-about-to-install-700-million-air-conditioners-heres-what-that-means-for-the-climate/>, consulté le 16 juillet 2017.

ZAIN, Z.M, TAIB, M.N, & BAKI, S.M.S. (2007). Hot and humid climate : prospect for thermal comfort in residential building. *Desalination*, 209(1-3), pp.261-268.

ZHAO, L., ZENG,W., & YUAN, Z. (2015). Reduction of potential greenhouse gas emissions of room air-conditioner refrigerants : a life cycle carbon footprint analysis, *Journal of Cleaner Production*, 100, pp.262-268.

ZRAH, M.H., & KOHLER, G. (2013). Le déploiement des énergies propres à Delhi aux prises avec la défiance de la société urbaine. *Flux*, (3), pp. 31-42.

Littérature grise

Bradsher, K. (2007). *As Asia Keeps Cool, Scientists Worry About the Ozone Layer*. New York Times

ActuEnvironnement (Juin 2009). *Dossier la climatisation solaire*. EN LIGNE : https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/climatisation_solaire/climatisation_solaire.php4, consulté le 14 juillet 2017.

Bréville B. (Août 2017). *Histoire d'une passion américaine. L'air conditionné à l'assaut de la planète*. Le Monde diplomatique. EN LIGNE : <http://www.monde-diplomatique.fr/2017/08/BREVILLE/57768>, consulté le 15 juin 2017.

Clean Energy Ministerial (Août 2014). SEAD and India's Bureau of Energy Efficiency host workshop on Enhancing space cooling efficiency and demand response. EN LIGNE : <http://www.cleanenergyministerial.org/News/sead-and-india-bureau-of-energy-efficiency-host-workshop-on-enhancing-space-cooling-efficiency-and-demand-response-565>, consulté le 1 juillet 2017.

Daikin Industries (s.d). *Market Potential*. EN LIGNE : http://www.daikin.com/about/why_daikin/rise/, consulté le 13 mars 2017.

Maps of India (s.d). *Annuel average temperatures in India*. EN LIGNE : <http://www.mapsofindia.com/>, consulté le 26 juillet 2017.

Nations Unies. (s.d). *Objectifs du millénaire pour le développement et l'après-2015*. EN LIGNE : <http://www.un.org/fr/millenniumgoals/>, consulté le 15 mai 2017.

Nowshin N. (Juin 2017). *Zero-power cooling, with plastic*. The Hindu. EN LIGNE : <http://www.thehindu.com/specials/impact-journalism-day-2017/eco-cooler-the-worlds-first-ever-zero-electricity-air-conditioner-made-out-of-plastic-bottles/article19108375.ece>

Perspectives Mondes (2017). En ligne : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?langue=fr&codePays=IND&codeStat=NY.GDP.MKTP.KD&codeStat2=x>, consulté le 24 juin 2017.

Oxford Dictionaries (s.d). En ligne : <https://en.oxforddictionaries.com/definition/penetration>, consulté le 15 décembre 2016.

Planète Info (s.d). *Ilôt de chaleur urbain*. Planète EN LIGNE: https://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/ilot-chaleur-urbain.php, consulté le 15 octobre 2017.

Rosenthal. (Août 2012). *The cost of cool*. NY Times. EN LIGNE : http://www.nytimes.com/2012/08/19/sunday-review/air-conditioning-is-an-environmental-quandary.html?pagewanted=2&_r=3&, consulté le 4 mars 2017.

The Guardian (Juin 2014). *Air conditioning raising night-time temperatures in the US*. Guardian Environment Network, EN LIGNE : <https://www.theguardian.com/environment/2014/jun/09/air-conditioning-raising-night-time-temperatures-us>, consulté le 15 mai 2017.

Thiberge, C. (Octobre 2016). *Climat : accord historique pour éliminer les gaz HFC, 14 000 fois plus puissant que le CO2*, Le Monde, EN LIGNE : http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/10/15/premier-pas-vers-la-suppression-des-hydrofluorocarbones-supergaz-a-effet-de-serre_5014205_3244.html, consulté le 15 juin 2017.

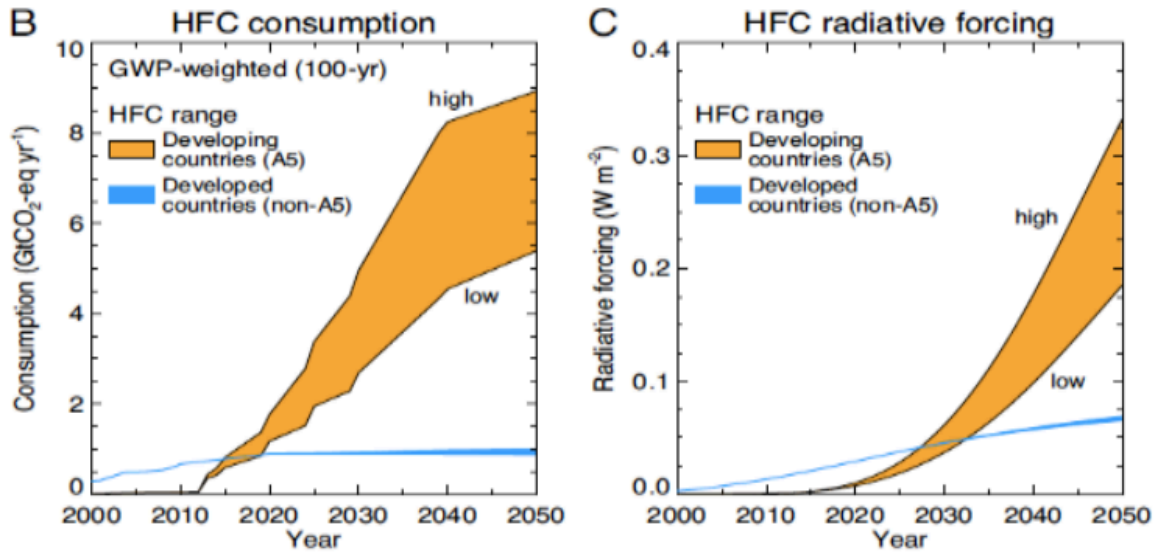
Annexes

Annexe 1: Tableau des quelques alternatives pour la climatisation et leurs disponibilités en Inde.

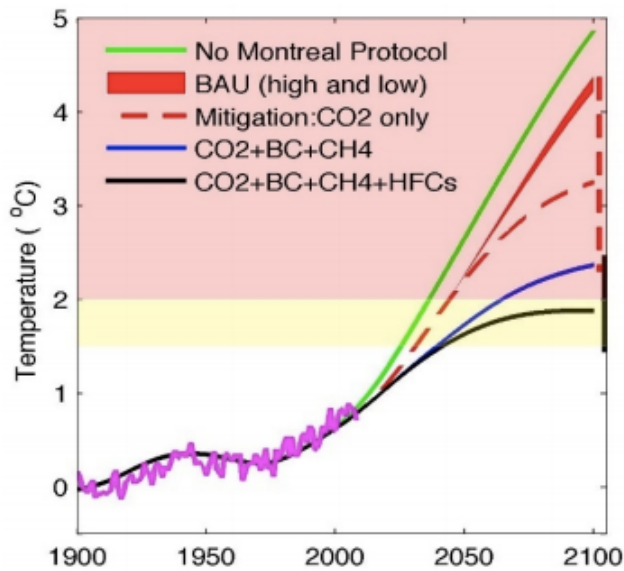
Source : PALAKSHAPPA, R. (2013).

REFRIGERANT	GWP (SEE N. 9)	ENERGY EFFICIENCY	ASHRAE & ISO FLAMMABILITY	MARKET STATUS	REGULATORY STATUS
Current High-GWP Refrigerant Used in Room Air Conditioner					
HCFC-22	High (1760)	High	Class 1: Not flammable	Scheduled for phase-out under the Montreal Protocol, with a reduction scheduled over time in India.	No longer allowed in new appliances sold in the E.U., the U.S., or other developed countries
Replacements for HCFC-22 in Room Air Conditioner					
HFC-410a	High (2088)	Low	Class 1: Not flammable	Has been licensed to a number of global chemical producers and its patents are expiring.	
HFC-32	Medium (677)	High	Class 2L: Mildly flammable	There will be multiple suppliers of HFC-32, since the chemical is already manufactured as a component of HFC-410a; patents for manufacturing HFC-32 have long expired, guaranteeing competitive pricing; Daikin is producing HFC-32 air conditioners, including in India. Daikin has announced that it will allow companies in developing countries to use basic HFC-32 air-conditioning patents at no charge through "non-assertion contracts."	
HC-290 (Propane)	Low (<5)	High	Class 3: Highly flammable, but is approved by respected national and international safety authorities for refrigeration and air-conditioning applications with relatively small charges and explosion-proof electrical connections and components such as switches.	Godrej in India produces room air conditioners using HC-290; Gree in China and more than half of the manufacturers in China have chosen HC-290. Two air-conditioner production lines and a compressor production line have already been converted. China adopted IEC 60335-2-40, which will enter into effect in July 2013, allowing air conditioners to be charged with up to 350 grams of HC-290.	Companies have yet to apply to the United States Environmental Protection Agency (EPA) for the Significant New Alternatives Policy (SNAP) approval
HFO/HFC blends (DR7, L41, L20)	Medium (~350 to ~700)	Neutral to Positive	Class 1: (not flammable) or Class 2L: (mildly flammable)	DuPont, Honeywell, Arkema, and other companies announced plans to commercialize low-GWP blends suitable for room air conditioners; they are not yet available in commercial room air-conditioner products.	

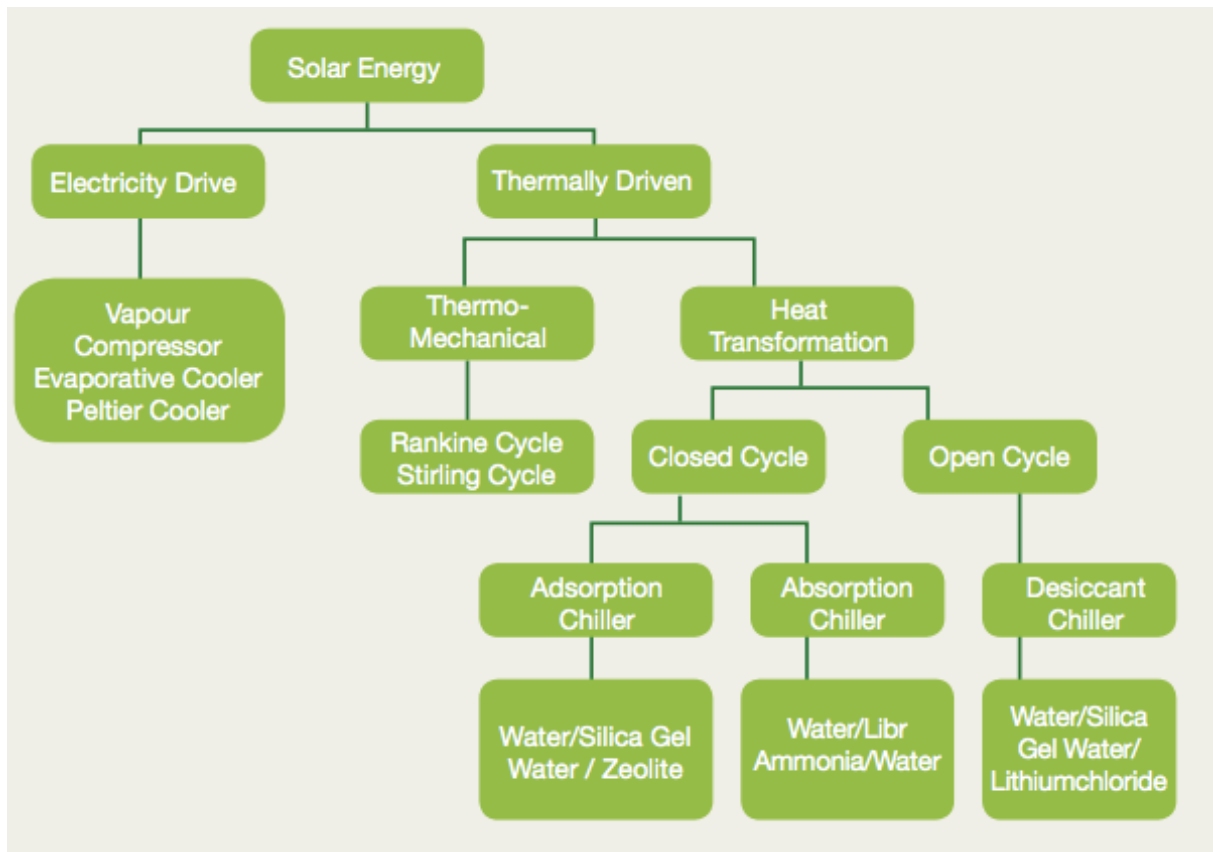
Annexe 2: Projection de la croissance des hydrofluorocarbures en terme de consommation et de forçage radiatif. Source : Zaelke *et al*, IGSD, 2017.



Annexe 3: Réchauffement pouvant être évité en atténuant les polluants à courte durée de vie et le CO₂. Source : Zaelke *et al*, IGSD, 2017.



Annexe 4 : Catégorisation selon les différences techniques de climatisation solaire. Source : Padigal *et al*, 2014.



Annexe 5 : Climatisation solaire : type de refroidisseurs commercialisés et quelques fabricants. Source : Padigal *et al*, 2014.

Chiller Type	Capacity	Material Pairs	Manufacturers
Absorption Chiller	10 kW – 5 MW	H ₂ O/LiBr, NH ₃ / H ₂ O, H ₂ O / LiCl	Yazaki, EAW Germany, Thermax, Pink, Climatewell, AGO Germany, Broad Air, Carrier, Voltas, York, McQuay, and Shuangliang Trane.
Adsorption Chiller	10 kW – 500 kW	H ₂ O/silica gel, H ₂ O / LiCl, H ₂ O/ zeolite	Mitsubishi, SorTech, Invensor, Mayekawa and SJTU.
Desiccant Chiller	20 kW – 350 kW	H ₂ O/silica gel, H ₂ O / LiCl	Imtech Drygenic, AIL Research, L-DSC Technology and Menerga.

