



18 mai 2015

13.074 n Stratégie énergétique 2050, premier paquet de mesures

Hypothèses et méthodes de diverses études portant sur les perspectives énergétiques

Rapport à l'intention de la CEATE-E

Table des matières

1. Contexte	3
2. Principales hypothèses, données cadre macroéconomiques et aperçu des principaux résultats de différentes études	5
2.1. Fondement des modèles de la Stratégie énergétique 2050	6
2.1.1. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050 (Prognos, 2012), résumé disponible en français	6
2.1.2. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, volkswirtschaftliche Auswirkungen (Ecoplan, 2012)	11
2.2. Scénarios pour l'approvisionnement électrique du futur (AES, 2012)	12
2.3. Energiezukunft Schweiz (ETH 2011)	14
2.4. Kosten der (Nicht-)Energiewende (Meier 2013).....	16
2.5. Energiestrategie 2050: eine institutionelle und ökonomische Analyse (IWSB, Borner et al., 2014)	17
2.6. Energiewende in der Schweiz: Simulationsergebnisse zur Energiestrategie des Bundes KOF ETH 2013 (Egger et Nigai, 2013)	18
2.7. Energy [r]evolution (Greenpeace, 2013)	19
2.8. Stratégie énergétique Cleantech 4.0 (Cleantech, 2014).....	21
3. Bibliographie.....	22

1. Contexte

Lors de sa séance du 31 mars 2015, la Commission de l'environnement, de l'aménagement du territoire et de l'énergie (CEATE-C) a chargé l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) d'élaborer un aperçu de diverses études dans le domaine des perspectives énergétiques quant aux hypothèses et résultats principaux. Ce rapport présente ainsi brièvement différentes études réalisées, et publiées entre 2011 et 2014 par l'OFEN et d'autres institutions dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050 du Conseil fédéral. Ces études ont été rendues publiques après la catastrophe nucléaire de Fukushima. Par ailleurs, l'Institut Paul Scherrer (PSI) a publié en décembre 2014 une comparaison détaillée des scénarios établis par diverses études dans le domaine de l'électricité (PSI 2014)¹. Reste que cette analyse ne concerne que le domaine de l'électricité, les autres aspects du système de l'énergie (p. ex. consommation finale d'énergies fossiles) n'ont pas été abordés.

La comparaison est effectuée sur la base des rapports publiés. Les études prises en compte sont indiquées dans le Tableau 1. Or, elles ne représentent qu'une petite partie de tous les documents publiés dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050. Ce rapport traite uniquement d'études se fondant - du moins en partie - sur leurs propres analyses (modélisations). Il n'examine pas de méta-études, qui comparent et commentent d'autres travaux.

Dans l'ensemble, il est possible d'affirmer que la plupart des études basées sur un modèle formulent des hypothèses liées à des conditions cadre issues de sources fiables. Aussi les hypothèses concernant l'évolution démographique, du PIB et des prix internationaux de l'énergie (pour autant qu'elles ne soient pas prises en compte à titre endogène) sont-elles pour la plupart issues de scénarios de l'Office fédéral de la statistique (OFS), du Secrétariat d'Etat à l'économie (SECO) et de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), comme dans les Perspectives énergétiques de la Confédération. Les divergences dans les scénarios de développement du système énergétique et la modélisation correspondante aboutissent dans certains cas à des résultats différents.

De plus, il faut noter les perspectives énergétiques sont axées sur le long terme et fixent des objectifs intermédiaires pour l'encouragement des énergies renouvelables, respectivement de l'efficacité énergétique (2020, 2035, 2050). Les fluctuations des conditions cadre dues à la conjoncture, comme par exemple le franc fort, ont un impact à court terme. Elles n'ont qu'une influence marginale sur l'atteinte des objectifs définis dans la Stratégie énergétique 2050. Le cas échéant, l'atteinte des objectifs est repoussée de quelques années. Les écarts demeurent inévitables, ceux qui ont une incidence favorable sur l'atteinte des objectifs aussi. Comme par exemple les progrès technologiques qui interviendront très probablement dans les vingt à trente prochaines années, mais qui n'ont pas encore été pris en compte dans les perspectives (évolution technologique modérée).

¹ Disponible sur: http://www.psi.ch/eem/PublicationsTabelle/PSI-Bericht_14-05.pdf

Titre succinct	Auteur, titre exact de l'étude	Année
Prognos 2012	Prognos SA / OFEN, <i>Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050</i> , Bâle, septembre 2012; résumé disponible en français	2012
Ecoplan 2012	Ecoplan, <i>Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Schlussbericht</i> , septembre 2012; en allemand uniquement	2012
ETH 2011	G. Andersson, K. Boulouchos & L. Bretschger, <i>Energiezukunft Schweiz</i> , Energy Science Center, ETHZ, Zurich, novembre 2011; en allemand uniquement	2011
AES 2012	Association des entreprises électriques suisses (AES), Scénarios pour l'approvisionnement électrique du futur, Aarau, 2012	2012
Greenpeace 2013	Greenpeace, energy [r]evolution - un approvisionnement énergétique durable pour la Suisse, novembre 2013	2013
Cleantech 2014	Association économique swisscleantech, Stratégie énergétique Cleantech, version 4.0, novembre 2014	2012
Meier 2013	B. Meier. <i>Kosten der (Nicht-)Energiewende. Studie im Auftrag der Schweizerischen Energie-Stiftung SES</i> , 17 juin 2013, Winterthur; en allemand uniquement	2013
IWSB 2014	S. Borner, D. Hauri, B. Wyss, B. Schips & M. Saurer: <i>Energiestrategie 2050: eine institutionelle und ökonomische Analyse</i> ; en allemand uniquement	2014
KOF-ETH 2013	P. Egger, S. Nigai, <i>Energiewende in der Schweiz: Simulationsergebnisse zur Energiestrategie des Bundes</i> , KOF Studien, 38, Zurich, janvier 2013; en allemand uniquement	2013

Tableau 1: Liste des études prises en considération dans le présent rapport

Le type d'approche et les délimitations variant d'une étude à l'autre, il est difficile de les présenter de manière uniforme à des fins de comparaison. D'autre part, les études divergent les unes des autres pour ce qui concerne leur portée et leur profondeur d'analyse. Le Tableau 2 classe les différentes études en fonction de plusieurs paramètres, à savoir: le modèle, l'horizon temporel, les agents énergétiques, les mesures et les résultats des modélisations. Si les études sont brièvement présentées ci-après, nous avons cependant renoncé à les comparer de manière détaillée.

Etude	Basée sur modèle	Horizon temporel	Agents énergétiques	Mesures	Résultats de la modélisation				
					Demande	Offre	CO ₂	Coûts	Effets macroécon.
Prognos 2012	oui	2050	tous	oui	oui	oui	oui	oui	non
Ecoplan 2012	oui	2050	tous	oui	oui	oui	oui	oui	oui
AES 2012	oui	2050	électricité	oui	Electricité	oui	oui	oui	oui
ETH 2011	en partie	2050	tous	non	oui	oui	oui	oui	oui
Greenpeace 2013	en partie	2050	tous	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Cleantech 2014	oui	2050	tous	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Meier 2013	oui	2050	tous	oui	oui	oui	non	oui	non
IWSB 2014	non	2050	électricité	non	non	en partie	non	oui	non
KOF-ETH 2013	Oui	2000 (statique)	tous	oui	oui	oui	oui	oui	oui

Tableau 2: représentation synoptique des études

2. Principales hypothèses, données cadre macroéconomiques et aperçu des principaux résultats de différentes études

Les modèles de systèmes énergétiques (*bottom-up*) - tels que ceux appliqués par exemple dans les Perspectives énergétiques - démontrent, à l'aide de scénarios, l'impact des mesures prises ou des voies empruntées sur le plan de la politique énergétique pour atteindre les objectifs fixés. Souvent, les effets macroéconomiques des résultats des modèles de systèmes énergétiques (*bottom-up*) sont vérifiés au moyen de modèles d'équilibre généraux. Il s'agit en premier lieu de déterminer comment la croissance démographique, la croissance économique (PIB), les prix de l'énergie (évolution des données cadre), les progrès techniques, les prescriptions, les instruments tarifaires et les instruments d'encouragement (instruments politiques) influencent le système de l'énergie. A cette fin, différents scénarios cohérents en soi (analyses de type «si, alors») sont examinés. D'autre part, les incidences économiques sont déterminées au moyen de modèles d'équilibre généraux (Ecoplan 2012).

Les paragraphes ci-après sont consacrés aux hypothèses des scénarios des différentes études, aux données cadre macroéconomiques, et à la présentation des principales grandeurs qui en sont déduites. Le système de l'énergie est fortement influencé, non seulement par des contraintes d'ordre général (comme p.ex. la sortie du nucléaire, etc.), mais aussi par les prix internationaux de l'énergie, des politiques internationales (des voitures à faible consommation ne peuvent être importées en Suisse que si ces dernières sont produites au niveau international) la structure économique de la Suisse, l'évolution démographique, etc. Dans de nombreux modèles, ces données cadre sont déterminées par des facteurs exogènes. Ces contraintes sont nécessaires, étant donné que les scénarios visent à établir la quantité d'énergie nécessitée par la population et l'économie. Les valeurs indiquées dans le présent rapport correspondent aux chiffres publiés dans les études examinées. Dans de nombreux cas cependant, les hypothèses et les chiffres détaillés ne sont pas publiquement accessibles.

2.1. Fondement des modèles de la Stratégie énergétique 2050

2.1.1. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050 (Prognos, 2012), résumé disponible en français

Données cadre	Scénario	Unité	2010	2020	2035	2050	Source:
Croissance démographique	tous	mio.	7,9	8,4	8,9	9,0	OFS. Sc. A-00-2010
Croissance économique PIB, réel, 2010	tous	mrd CHF	547	618	700	801	SECO 2010
Structure des branches en Suisse	tous	Evolution par branches élaborée par la Chancellerie fédérale et l'Office fédéral de la statistique, avec l'aide d'un groupe d'accompagnement interdépartemental.					
Surfaces de référence énergétique	tous	mio. m ²	708,8	798,5	885,7	937,5	Wüest & Partner, adaptation de Prognos
Volumes de trafic, trafic voyageurs	PPA/PCF	mrd pers.-km	114,2	131,1	146,0	151,3	ARE, 2012, Perspectives d'évolution du trafic
	NPE	mrd pers.-km	114,2	126,6	137,0	140,3	ARE, 2012, Perspectives d'évolution du trafic
Volumes de trafic, trafic marchandises	PPA/PCF	mrd tonnes-km	26,9	34,2	40,3	42,3	ARE, 2012, Perspectives d'évolution du trafic
	NPE	mrd tonnes-km	26,9	34,5	39,3	39,7	ARE, 2012, Perspectives d'évolution du trafic
Prix de l'énergie sur le marché mondial, pétrole, réel 2010	PPA/PCF	USD/baril	76	99,9	114,1	116,9	AIE WEO 2010, New policy, Prognos
	NPE	USD/baril	76	90,8	90,9	83,5	AIE WEO 2010, Scénario 450, Prognos
Prix du CO ₂ selon ETS, réel 2010	PPA/PCF	USD/tonne	15	38	50	56	AIE WEO 2010, New policy, Prognos
	NPE	USD/tonne	15	45	120	137	AIE WEO 2010, Scénario 450, Prognos
Taux de change (EURO/CHF)	tous	-	1,38	1,38	1,38	1,38	
Taux de change (USD/CHF)	tous	-	1,04	1,04	1,04	1,04	
Taux d'intérêt (macroéconomique)	tous			2,5%			

Tableau 3: Données cadre dans Prognos, 2012

En vue de définir les Perspectives énergétiques 2050 (PE 2050), l'évolution possible de la demande et de l'offre énergétiques est examinée dans chaque secteur (ménages, industrie, services et transports) ainsi qu'à l'aide un modèle de production d'électricité. Quatre variantes d'offre sont analysées pour répondre à la demande d'électricité. Dans les PE 2050, tous les agents énergétiques sont pris en compte. Elles examinent aussi bien les scénarios aux mesures prédéfinies (axés sur les mesures) «Poursuite de la politique actuelle» (PPA) et «Mesures politiques du Conseil fédéral» (PCF) que le scénario axé sur les objectifs «Nouvelle politique énergétique» (NPE); ce dernier vise à atteindre, d'ici 2050, un système permettant de réduire les émissions de CO₂ dues à l'énergie à 1,5 t par habitant.²

La modélisation se base sur l'évolution structurelle exogène de la société et de l'économie sur le long terme (population, PIB, structure des branches, employés inclus ainsi que les conditions cadres internationales comme les prix agents énergétiques sur les marchés internationaux) d'ici 2050; l'évolution est la même pour tous les scénarios. L'OFEN a recours à la documentation officielle émanant d'autres services fédéraux, pour autant que disponible, ce qui garantit la transparence des

² Pour une description détaillée des scénarios, voir Prognos 2012. Ce scénario NPE axé sur les objectifs suppose une harmonisation des politiques énergétiques au plan international (dans le secteur des transports, les technologies *best practice* p. ex. ne peuvent être appliquées de façon plus poussée que si l'industrie automobile européenne et outre-mer fournit les véhicules appropriés).

sources. D'autre part, cette façon de procéder contribue à améliorer la comparabilité des études réalisées par l'administration fédérale.

Ces directives influencent fortement les valeurs déduites pour les différents modèles. Ces hypothèses permettent de déduire une structure dynamique de ce que l'on appelle des composantes quantitatives. Celles-ci désignent les activités économiques déterminantes pour la demande énergétique (p. ex. surfaces habitables chauffées, prestations de transport ou parc de véhicules, volumes de production et places de travail). Cette structure reste la même dans les différents scénarios, à l'exception toutefois des prestations de transport; dans le scénario NPE, celles-ci sont légèrement adaptées en fonction de l'objectif visé et du contexte politique dans lequel se situe le scénario.

Les prix suisses de l'énergie sont fortement corrélés aux prix énergétiques sur les marchés internationaux, compte tenu des fluctuations de cours de change, d'éventuels coûts de transformation, des impôts et de la taxe sur le CO₂. De plus, le prix suisse de l'électricité tient compte du coût de revient du courant produit dans le parc des centrales nucléaires, ainsi que du coût des combustibles et de l'évolution des coûts d'utilisation du réseau.

La consommation d'énergie résulte d'une multitude d'utilisations conjuguées. Le système énergétique est représenté sur une base physique à l'aide de ce que l'on appelle la modélisation *bottom-up*. L'offre d'électricité est analysée avec un parc de centrales détaillé. Différentes hypothèses sont formulées dans ce contexte. Le commerce transfrontalier est analysé au moyen du bilan national. La lacune d'électricité est comblée à l'aide d'une modélisation purement physique. La question de savoir si ce besoin est couvert en Suisse ou à l'étranger relève d'un débat politique et social, non d'une modélisation. Voilà pourquoi des variantes cadre sont élaborées pour différentes technologies (centrales à gaz à cycle combiné, énergies renouvelables, importations, etc.). On ne part pas d'un type de marché de l'électricité spécifique, duquel découleraient des règles d'application supplémentaires pour les technologies de production concernées. Le coût de revient de l'électricité au sens économique est calculé selon une approche macroéconomique et avec un taux d'intérêt de 2,5%, la durée d'amortissement étant équivalente à la durée de vie technique de l'installation.

Principaux résultats de l'étude

Le Tableau 4 présente l'évolution de la consommation d'énergie finale dans les différents scénarios modélisés. Les mesures d'ores et déjà décidées implémentées dans le scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle» ont pour effet de stabiliser dans un premier temps la consommation d'énergie finale puis, à long terme, de l'abaisser. La consommation d'énergie finale du scénario «Mesures politiques du Conseil fédéral» (PCF) diminue de 32,7 % entre 2010 et 2050.

	Demande d'énergie finale (en PJ)					Demande d'énergie finale par habitant (en GJ)					Demande d'énergie finale en unité de PIB (en MJ par CHF)				
	2000	2010	2020	2035	2050	2000	2010	2020	2035	2050	2000	2010	2020	2035	2050
PPA	777	841	788	706	658	108	107	93	79	73	1,7	1,5	1,3	1,0	0,8
PCF	777	841	767	639	565	108	107	91	72	63	1,7	1,5	1,2	0,9	0,7
NPE	777	841	734	549	451	108	107	87	62	50	1,7	1,5	1,2	0,8	0,6

Tableau 4 : Demande d'énergie finale par habitant et par unité de PIB, selon les scénarios (chiffres absolus en PJ)

Dans le scénario PCF, les émissions de CO₂ liées à la demande énergétique finale par habitant diminuent jusqu'en 2050 de près d'un tiers par rapport à l'année 2000. Dans le scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle» déjà, ces émissions se réduisent de moitié. Cette évolution

s'explique par la substitution du gaz naturel et des agents énergétiques renouvelables au mazout pour couvrir la demande de chaleur, par la substitution du diesel à l'essence et par l'électrification du trafic privé. En outre, les normes d'émission appliquées aux véhicules pour voyageurs modèrent la consommation de carburants fossiles.

Le total des émissions de CO₂ dues à l'énergie se compose des émissions liées à la demande et de celles liées à l'offre. Le Tableau 5 présente les émissions totales de CO₂ (demande, transformation et différence statistique) dues à l'énergie au sens de la loi sur le CO₂.

Emissions de CO ₂ Variantes d'offre	2000	2010	2020			2035			2050		
			PPA	PCF	NPE	PPA	PCF	NPE	PPA	PCF	NPE
Var. C (total)	40,8	41,5	36,4	34,3	30,8	36,1	29,7	21,5	31,4	23,2	12,4
Var. C&E (total)	40,8	41,5	36,1	34,0	30,5	33,7	27,3	19,3	26,6	19,6	10,0
Var. E (total)	40,8	41,5		34,0	30,5		23,6	16,4		17,3	9,2
Var. C (par hab.)	5,7	5,3	4,3	4,1	3,7	4,1	3,3	2,4	3,5	2,6	1,4
Var. C&E (par hab.)	5,7	5,3	4,3	4,0	3,6	3,8	3,1	2,2	2,9	2,2	1,1
Var. E (par hab.)	5,7	5,3		4,0	3,6		2,7	1,8		1,9	1,0

Tableau 5: Emissions totales de CO₂ dues à l'énergie, au sens de la loi sur le CO₂ et émissions totales de CO₂ dues à l'énergie par habitant

La demande électrique croît continuellement entre 2000 et 2050 dans le scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle». Dans le scénario «Nouvelle politique énergétique», la demande électrique augmente jusqu'en 2016, puis elle diminue légèrement jusqu'en 2035 et 2050. Dans le scénario «Mesures politiques du Conseil fédéral», les instruments et mesures proposés permettent de réduire la demande électrique par habitant jusqu'en 2035. Dès 2035, la demande progresse de nouveau légèrement. Il faut considérer d'une part, comme pour la demande énergétique, que les instruments et mesures sont dotés de moyens inchangés (c'est-à-dire nominalement constants) jusqu'en 2050 et que les mesures d'efficacité les moins onéreuses sont prises les premières années. D'autre part, l'électrification accrue du trafic privé influence aussi la demande électrique par habitant à partir de 2035. Les observations concernant le scénario «Mesures politiques du Conseil fédéral» valent aussi pour le scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle». Mais comme ce dernier scénario prévoit nettement moins d'instruments et de mesures que le premier, la demande par habitant y est supérieure. Quant au scénario «Nouvelle politique énergétique», toutes les mesures d'efficacité doivent être mises en œuvre pour atteindre les objectifs fixés. Il en résulte une réduction de la consommation électrique par habitant jusqu'en 2050. Mais cette baisse s'atténue à partir de 2035, puisque les transports privés de voyageurs seront davantage électrifiés que dans le scénario «Mesures politiques du Conseil fédéral».

	Demande électrique en PJ					Demande électrique par habitant en GJ					Demande électrique selon le PIB en MJ par CHF				
	2000	2010	2020	2035	2050	2000	2010	2020	2035	2050	2000	2010	2020	2035	2050
PPA	185,1	211,5	221,3	232,0	248,5	25,7	26,8	26,2	26,1	27,5	0,4	0,39	0,36	0,33	0,31
PCF	185,1	211,5	211,1	208,5	219,1	25,7	26,8	25,0	23,5	24,2	0,4	0,39	0,34	0,30	0,27
NPE	185,1	211,5	210,4	198,2	190,9	25,7	26,8	24,9	22,3	21,1	0,4	0,39	0,34	0,28	0,24

Tableau 6 : Demande électrique, scénarios «Poursuite de la politique énergétique actuelle», «Mesures politiques du Conseil fédéral» et «Nouvelle politique énergétique», en chiffres absolus (PJ), par habitant et par unité de PIB, selon les scénarios.

Les variantes d'offre d'électricité utilisent différentes options pour couvrir les besoins. Selon la variante d'offre choisie, divers potentiels peuvent être réalisés. Dans la variante C, on utilise surtout des centrales thermiques fossiles. Dans la variante C&E, les énergies renouvelables (et les capacités de développement actuelles de la force hydraulique) sont utilisées en priorité. La lacune de couverture sera comblée, selon la variante choisie, avec des centrales thermiques fossiles centralisées (centrales à cycles combinés alimentées au gaz). La variante E recourt prioritairement aux énergies renouvelables et comble les lacunes de couverture au moyen des importations. Deux voies distinctes sont considérées pour le développement des agents énergétiques renouvelables. Dans la variante d'offre C, on examine un développement modéré. Dans les variantes d'offre C&E et E, on suppose un fort développement.

La stratégie énergétique utilise généralement des différentiels de coûts. Cela signifie que les coûts macroéconomiques des scénarios sont comparés à ceux du scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle». Pour comparer l'évolution de ces coûts, ces derniers sont actualisés sur la base d'un taux d'intérêt macroéconomique. Par rapport au scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle», les investissements dans l'efficacité énergétique, respectivement le développement des énergies renouvelables permettent de réduire les importations, ces économies sur les importations sont également prises en compte.

Solde des coûts en millions de CHF	2010	2020		2035		2050		2010-2050		Valeur actualisée 2010-2050	
		PCF	NPE	PCF	NPE	PCF	NPE	PCF	NPE	PCF	NPE
Investissements	50	1'239	2'064	2'932	5'520	3'011	6'678	84'684	162'038	47'352	89'050
Importations d'agents énergétiques	0	-587	-962	-1'543	-2'891	-1'899	-3'497	-46'310	-84'614	-25'534	-46'255
Economies du parc de centrales par rapport au scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle», variante C											
Var. C	0	-156	-209	-927	-697	-1'188	-1'747	-24'576	-26'195	-12'746	-13'333
Var. C&E	0	182	-4	-753	-767	-766	-1'283	-13'135	-16'978	-5'659	-7'553
Var. E	0	182	-4	-925	-1'232	-939	-1'574	-17'005	-253'28	-7'614	-11'764
Coûts totaux résultants par rapport au scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle», variante C											
Variante C	50	496	893	461	1'932	-76	1'434	13'798	51'228	9'072	29'462
Variante C&E	50	834	1'098	635	1'862	346	1'898	25'239	60'445	16'159	35'242
Variante E	50	834	1'098	463	1'397	173	1'607	21'369	52'095	14'204	31'031

Tableau 7: Solde des coûts supplémentaires et des réductions de coûts des variantes d'offre électrique dans les scénarios «Mesures politiques du Conseil fédéral» et «Nouvelle politique énergétique, par rapport au scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle».

Les coûts totaux actualisés du parc de centrales sont présentés dans les perspectives énergétiques. Pour ce qui concerne l'offre d'électricité, la plus grande partie des coûts se situe sur les installations existantes. Ces coûts sont indépendants de la stratégie énergétique 2050.

	Valeur actualisée des coûts totaux de 2010 à 2050									
	PPA			PCF				NPE		
	C	C&E	E	C	C&E	C&E, sens. 1	E	C	C&E	E
Centrales hydroélectriques	96	98		96	98	98	98	96	98	98
Centrales nucléaires	21	21		21	21	21	21	21	21	21
Centrales thermiques conventionnelles	39	24		26	14	13	0	25	13	0
Installations CCF fossiles	9	9		9	9	9	9	10	10	10
ER avec CCF	10	18		10	18	18	18	9	18	18
ER	6	13		6	13	17	13	6	13	13
UIOM	4	4		4	4	4	4	4	4	4
Importations	13	13		13	13	13	26	13	13	22
Coûts totaux nets										
sans crédits pour rejets chaleurs	197	201		185	191	193	190	185	190	186
<i>Dont: développement net</i>										
sans crédits pour rejets chaleurs	72	75		59	66	67	64	59	64	60
<i>Dont: effectifs nets</i>										
sans crédits pour rejets chaleurs	126	126		126	126	126	126	126	126	126
sans crédits pour rejets chaleurs	11	13		11	13	14	13	11	14	14
Coûts totaux bruts	208	215		196	205	208	203	196	205	200

Tableau 8 : Valeur actualisée des coûts totaux, effectifs existants et développement, valeurs réelles sur la base des prix de 2010, en milliards de CHF.

Les résultats de la modélisation de Prognos 2012 servent de base à d'autres travaux de modélisation effectués dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050. Ils livrent les informations (demandes d'énergie et d'électricité, offre d'électricité) utilisées dans les modélisations des effets économiques (Ecoplan 2012) à titre de facteurs exogènes. Ils garantissent ainsi que ces analyses effectuées dans le domaine de l'énergie tiennent compte des mêmes évolutions des données cadre (croissances démographique et économique, développement des branches, évolution du prix de l'énergie).

2.1.2. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, volkswirtschaftliche Auswirkungen (Ecoplan, 2012)

Données cadre	Scénario	Unité	2008	2020	2035	2050	Source
Croissance démographique	tous	mio.	7,7	8,4	8,9	9,0	OFS, Sc. A-00-2010
Croissance économique PIB, réel, 2010	tous	mrd CHF	543	618	700	801	SECO 2010
Prix de l'énergie sur le marché mondial, pétrole, réel 2010	PPA	USD/baril	95	100	114	117	AIE WEO 2010, New policy, Prognos
	PCF						
	NPE	USD/baril	95	91	91	83	AIE WEO 2010, Scénario 450, Prognos
Prix du CO ₂ selon ETS, réel 2010	PPA	USD/tonne	20	38	50	56	AIE WEO 2010, New policy, Prognos
	PCF						
	NPE	USD/tonne	20	45	120	137	AIE WEO 2010, Scénario 450, Prognos
Taux de change (USD/CHF)	tous	-	1,59	1,43	1,35	1,23	
Taux de change (USD/CHF)	tous	-	1,09	0,98	0,87	0,75	

Tableau 9: Données cadre dans Ecoplan, 2012

Le modèle d'équilibre général utilisé montre l'impact de la Stratégie énergétique 2050 sur l'ensemble de l'économie suisse. Ce type de modélisation permet d'évaluer les effets de rétroaction et les effets indirects d'une hausse des prix de l'énergie. Le modèle a permis d'établir à combien devrait se monter une redevance sur les agents énergétiques fossiles et sur la consommation d'électricité pour atteindre les demandes d'énergie et d'électricité définies dans les scénarios PCF et NPE. En lieu et place de mesures individuelles, il détermine une taxe incitative «hypothétique» ayant le même effet sur l'évolution de la demande énergétique que le premier paquet de mesures défini par le Conseil fédéral (scénario PCF), et le scénario alternatif «Nouvelle politique énergétique» (NPE). Le modèle permet ainsi de déterminer et de démontrer d'une part les incidences économiques, et d'autre part les effets de répartition et de bien-être. Les données examinées se basent sur le tableau input - output de la Suisse en 2008. Les calculs présentés ici se fondent sur l'évolution de la demande et de l'offre énergétiques déterminées au moyen de modèles de système énergétique de Prognos (2012) selon le scénario de référence «Poursuite de la politique énergétique actuelle». Le modèle d'équilibre utilisé pour déterminer les effets économiques est calibré sur ce même scénario de référence. Par conséquent, les principales hypothèses sur l'évolution des données cadre sont semblables à celles des Perspectives énergétiques 2050 (Prognos, 2012).

Les résultats de l'étude démontrent qu'en 2050, si l'on ne tient pas compte des bénéfices secondaires, le bien-être dans le scénario «Mesures politiques du Conseil fédéral» est environ 0,2% inférieur à celui du scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle». En 2050, le scénario «Mesures politiques du Conseil fédéral» prévoit un PIB inférieur de quelque 0,6% à celui du scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle». Si l'on convertit cette différence de niveau en taux de croissance annuelle du PIB, il en résulte une perte de croissance annuelle moyenne de quelque 0,02%. Les incidences sur l'emploi sont elles aussi légèrement négatives. Dans le scénario «Nouvelle politique énergétique», le recul du bien-être sans prise en compte des bénéfices secondaires atteint environ 0.9% en 2050 par rapport au scénario «Poursuite de la politique énergétique actuelle», alors que le PIB diminue de 2,7% en 2050. Lorsque la différence de niveau du PIB de -2,7% est convertie en un taux de croissance annuel, il en résulte une perte de croissance de 0,08% par an.

2.2. Scénarios pour l'approvisionnement électrique du futur (AES, 2012)

Données cadre	Scénario	Unité	2010	2020	2035	2050	Source
Croissance démographique	tous	mio.	7,95	p. d.	p. d.	9,0	OFS, Sc. A-00-2010
Croissance économique PIB, réel, 2010							Propres hypothèses
Structure des branches en Suisse							
Prix de l'énergie sur le marché mondial, pétrole	tous	USD/baril	p. d.	101,8	103,9	106,5	Pöyry 2012, brent crude benchmark
Prix du gaz en Suisse	tous	€/ MWh	p. d.	24,6	32,8	33,4	Pöyry 2012, undelivered annual TWA
Gaz allemand	tous	€/ MWh	p. d.	24,6	32,8	33,4	Pöyry 2012, undelivered annual TWA
Prix du CO ₂ selon ETS, réel 2010	tous	USD/tonne	p. d.	27,7	59,8	59,8	Pöyry 2012

Tableau 10: Données cadre dans AES, 2012 – (p.d. = pas de données)

Dans l'étude qu'elle a publiée, l'Association des entreprises électriques suisses (AES) présente trois scénarios pour l'approvisionnement électrique d'ici 2035 et 2050; aucun ne propose une variante pour la construction de nouvelles centrales nucléaires. Cette étude est focalisée sur le domaine de l'électricité et non sur le système énergétique dans son ensemble. Elle se fonde sur les travaux élaborés par la branche et sur des études externes. Les trois scénarios appliquent différentes évolutions de la demande d'électricité.

Les hypothèses liées à la future évolution des prix des énergies primaires émises dans l'étude de l'AES se fondent sur une étude réalisée par Pöyry en 2012. Ces prix sont appliqués de la même manière dans tous les scénarios, étant donné que les scénarios du marché suisse de l'électricité n'ont aucune influence sur les marchés internationaux de l'énergie. Selon l'AES, la corrélation entre la croissance économique et la consommation d'électricité - intuitivement compréhensible - est prouvée dans la théorie économique; son effet cependant s'atténue avec le temps, puisque le pourcentage d'entreprises à forte consommation d'énergie recule en faveur du secteur tertiaire.

Le scénario 1 prévoit des objectifs en matière de politique énergétique et environnementale plus ambitieux que par le passé, avec des mesures modérément renforcées. Le scénario 2 table sur un changement durable en faveur d'une meilleure efficacité énergétique et d'un recours accru aux énergies renouvelables. Le nombre d'installations de production recourant à des sources d'énergie renouvelables construites est plus important que dans le scénario 1. Le scénario 3 quant à lui repose sur le schéma directeur d'une vision à long terme qu'est la société à 1 tonne de CO₂. Il prévoit qu'en 2050, la Suisse sera approvisionnée en électricité issue à 100% (en moyenne annuelle) de sources d'énergie renouvelables. Dans le rapport de l'AES, l'évolution de la demande d'électricité ne fait pas l'objet d'une modélisation intégrale. Les affirmations concernant la consommation d'électricité des ménages sont tirées d'une étude mandatée par l'AES et intitulée «Efficacité et électrification des ménages» (EBP 2012b). Une analyse *top-down* effectuée sur la base de l'évaluation d'études a été effectuée dans les secteurs de l'industrie, de l'artisanat et des services. L'étude réalisée par le cabinet de conseil Ernst Basler + Partner SA (EBP 2012a) met en évidence les estimations liées au potentiel d'économie d'électricité. Les hypothèses liées à l'évolution de la demande dans les pays voisins de la Suisse sont identiques dans les trois scénarios.

Une partie des données de l'AES est tirée du dialogue Energie Suisse 2009. Dans l'étude Pöyry, qui procède ensuite à la modélisation de l'offre d'électricité, la demande est considérée en tant que valeur exogène. Afin de répondre à la demande, des variantes d'offres ayant recours aux énergies renouvelables, aux centrales combinées à gaz et aux importations d'électricité sont examinées. La

modélisation est effectuée sur une base horaire à l'aide d'un modèle de marché de l'électricité. L'AES en déduit onze points essentiels pour l'avenir de l'électricité, selon la devise «un environnement de marché offre de meilleures incitations en terme de prix qu'une régulation et une réglementation exclusives».

Principaux résultats de l'étude

Consommation d'électricité (Consommation du pays)	Unité	2011	2020	2035	2050
Scénario 1	TWh/a	64.9	69.7	76.2	81
Scénario 2	TWh/a	64.9	69.4	72.8	73
Scénario 3	TWh/a	64.9	68.7	68.2	60.5

Tableau 11: Evolution de la consommation d'électricité dans les 3 scénarios de l'AES

La consommation d'électricité augmente continuellement dans le **scénario 1**. L'augmentation de la demande est de 25% entre 2011 et 2050. La demande augmente en raison de la croissance démographique d'une part et de la substitution de l'énergie fossile pour la chaleur et la mobilité d'autre part (développement de la mobilité électrique). Une meilleure efficacité énergétique et électrique permet de diminuer la demande (p.ex. sur le marché de la chaleur ou dans domaine de l'éclairage). Une meilleure efficacité s'impose également dans le secteur des grands appareils ainsi que pour les mécanismes de commande et les moteurs. Dans le **scénario 2**, l'augmentation de la demande (13% entre 2011 et 2050) est légèrement moins importante que dans le scénario 1 en raison d'une meilleure efficacité énergétique et électrique. La demande est en constante augmentation jusqu'en 2035 puis se stabilise. Dans le scénario 2 une augmentation de l'efficacité est attendue en particulier dans les secteurs de ménages et des services. Dans le **scénario 3**, les mêmes hypothèses que dans les scénarios 1 et 2 s'appliquent sur le fond, mais les objectifs sont plus élevés et la mise en œuvre accélérée. Le scénario 3 s'oriente sur la vision de la société à 1 tonne de CO₂ et à 2000 Watt. La consommation d'électricité recule de 8% d'ici à 2050 en raison de mesures radicales en matière de politique énergétique et de changements fondamentaux dans la consommation.

Concernant la production d'électricité, les trois scénarios se distinguent dans le développement de la production à partir d'énergies renouvelables et de centrales à gaz. Dans les calculs, le développement de la production d'origine renouvelable a été déterminé pour chaque scénario, tandis que la construction et l'exploitation de centrales à gaz à cycle combiné et d'installations CCF ainsi que le recours aux importations et aux exportations ont été calculés selon des critères de rentabilité pour couvrir la demande déterminée pour chaque scénario. Dans le scénario 1, des importations et des centrales à gaz à cycle combiné remplacent les capacités supprimées de l'énergie nucléaire. La production à partir d'énergies renouvelables augmente de 13 TWh d'ici 2050. L'augmentation s'opère essentiellement après 2035. Cela est complété par des importations et environ 7 à 8 centrales à gaz à cycle combiné à 400 MW, afin de remplacer les capacités supprimées de l'énergie nucléaire. Dans le scénario 2, la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables croît de 23 TWh d'ici 2050. Dans le scénario 3, cette dernière croît de 32 TWh. Dans le scénario 3, il n'y a pas de construction de centrales à gaz à cycle combiné en Suisse. La demande est couverte par les installations existantes et nouvellement construite ainsi que par des importations d'énergies renouvelables.

Dans l'étude de l'AES, les volumes d'investissement dans les réseaux et les installations de production sont présentés. Les renseignements fournis dans l'étude ne permettent pas de déterminer

s'il s'agit de coûts actualisés ou non. Selon l'étude de Pöyry 2012, un taux d'actualisation moyen a été utilisé.

Volume d'investissement dans les réseaux et les installations de production (réel, 2011)	2011 bis 2035			2011 bis 2050		
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Construction production thermique-fossile	2.5	1.4	0.0	2.7	1.4	0.0
Construction de production renouvelable	12.9	17.5	19.6	22.4	36.8	48.8
Développement du réseau haute tension	2.0	2.0	2.0	2.6	2.6	2.6
Développement et renforcement du réseau moyenne et basse tension (part attribuée au développement uniquement)	0.3	1.1	0.6	2.4	5.5	9.6
Investissements dans de nouveaux réseaux et dans la production	17.7	22.1	22.2	30.0	46.3	61.0
Maintien et modernisation du réseau et de la production existante	29.2	24.8	24.6	58	41.8	27.1
Investissements totaux, avec maintien et modernisation du réseau et de la production existante	64.6	68.9	69.0	118.1	134.4	149.1

Tableau 12: Volume d'investissement dans les réseaux et les installations de production, AES 2012

2.3. Energiezukunft Schweiz (ETH 2011)

Données cadre	Scénario	Unité	2010	2020	2035	2050	Source
Croissance démographique	faible	mio.	7,8	8	7,8	7,2	OFS, Sc. C-00-2010
	moyenne	mio.	7,8	8,4	8,8	9,0	OFS, Sc. A-00-2010
	forte	mio.	7,8	8,7	9,8	10,7	OFS, Sc. B-00-2010
Croissance économique PIB, réel, 2010		Non quantifiée, varie selon le scénario (forte, moyenne, faible)					
Emissions annuelles de CO ₂ par habitant		tonnes	5,1	3,9	2,7	1,56	

Tableau 13: Données cadre, ETHZ 2011

L'étude de l'EPF Zurich examine certaines options en vue de l'instauration d'un système énergétique durable en Suisse. Dans ce contexte, l'abandon progressif du nucléaire annoncé par le Conseil fédéral et les Chambres fédérales est une condition à respecter. L'étude élabore des scénarios à l'horizon 2050 et prévoit des étapes intermédiaires en 2020 et 2035. Se fondant sur les objectifs climatiques internationaux, elle déduit la trajectoire à suivre pour la demande d'agents énergétiques fossiles dans les secteurs de la chaleur et de la mobilité. Les développements requis dans les domaines du bâtiment et des technologies sont définis sur le plan qualitatif. L'étude part du principe que les objectifs climatiques globaux seront réalisés de façon coordonnée, du moins à l'échelle européenne. Les hypothèses fondamentales ne sont pas quantifiées. Dans le domaine du bâtiment, on table sur une progression du taux de renouvellement de 2% par an. Les chauffages électriques sont entièrement supprimés. Dans le domaine du trafic individuel, les prestations de transport se stabiliseront au niveau de 2010 après une hausse temporaire, malgré la croissance démographique. Les directives de l'UE applicables en matière d'émissions de CO₂ spécifiques aux véhicules à moteur d'ici 2020 sont spécifiées, puis judicieusement extrapolées. Si le trafic individuel fait l'objet d'une

électrification partielle dès 2020, la forte progression des transports de marchandises quant à elle devrait se poursuivre.

L'étude émet des hypothèses pour le revenu par habitant et l'intensité de l'électricité (rapport entre la consommation d'électricité et le PIB) sur la base des tendances extrapolées. Se fondant sur ces résultats, elle combine certains paramètres afin de déterminer divers scénarios pour la demande d'électricité des quarante prochaines années. La demande d'électricité est donc le produit des valeurs liées à la démographie, au revenu par habitant et à l'intensité de l'électricité. La consommation d'électricité prise en compte dans l'étude de l'EPF est fondée sur des hypothèses qui ne sont pas documentées de façon complète dans le rapport. Différentes hypothèses sont émises sur le potentiel de développement et le coût de revient pour la couverture des besoins en électricité. Pour ce qui concerne le potentiel de développement, chaque technologie est assortie d'une fourchette définie qui englobe également les valeurs déterminées dans les Perspectives énergétiques.

Principaux résultats de l'étude

Résultats	Scénario	Unité	2010	2020	2035	2050
Besoins en énergie chaleur	p.d.	TWh/a	89	77	51	25
Besoins en énergie pour la mobilité	p.d.	TWh/a	65	62	50	35
Consommation d'électricité (consommation du pays)	forte	TWh/a	63	73	82	92
	moyenne	TWh/a	63	70	75	79
	faible	TWh/a	63	67	66	66

Tableau 14: Evolution de la consommation d'électricité, ETH 2011

Les coûts de production des différentes technologies de production d'électricité ainsi que du mix électrique suisse (sans les coûts des réseaux) sont présentés dans l'étude de l'EPF. Ces coûts de production sont présentés pour différentes variantes (A à E), voir Tableau 15. Les coûts d'investissement et les coûts totaux ne sont pas indiqués.

Coûts de production - mix électrique suisse	Unité	2010	2020	2035	2050
Variante A (force hydraulique : 8 ct/kWh, nucléaire : 8 ct/kWh, thermique : 12 ct/kWh)	ct/kWh	8.2	9	9.4	9.1
Variante B: comme A mais avec les coûts pour le stockage (éolien/pv)	ct/kWh	8.2	9.1	9.7	9.7
Variante C1: comme B mais des coûts 40% plus élevés pour le pv	ct/kWh	8.2	9.2	9.7	9.6
Variante C2: comme B mais des coûts 30% moins élevés pour le pv	ct/kWh	8.2	8.8	9.1	8.6
Variante D: comme A, mais avec 6 ct/kWh pour le nucléaire	ct/kWh	7.4	8.3	9.2	9.1
Variante E: comme A, mais avec 10 ct/kWh pour le nucléaire	ct/kWh	9	9.7	9.6	9.1

Tableau 15: Evolution des coûts de production pour le mix électrique suisse (sans les réseaux), ETH 2011

Les incidences macroéconomiques de deux scénarios (avec et sans abandon du nucléaire) sont évaluées au moyen d'un modèle d'équilibre général, à savoir le modèle d'équilibre général CITE (*Computable Induced Technical Change and Energy*) de l'EPF Zurich. Les données examinées se basent sur le tableau input - output de la Suisse en 2005. Douze branches sont examinées. Ce modèle se distingue en ce qu'il évalue la croissance de l'économie en tant que facteur endogène et non en tant que paramètre exogène. L'étude détermine deux scénarios. La trajectoire A part d'une

réduction des émissions de CO₂ de 65% d'ici 2050 et d'une redevance incitative perçue sur les agents énergétiques fossiles intégralement restituée aux ménages. La trajectoire B prévoit, en plus de l'objectif climatique de la trajectoire A, l'abandon progressif de l'énergie nucléaire.

L'étude en conclut que, en raison notamment de l'horizon temporel visé (plusieurs décennies), la transformation du système énergétique (amélioration de l'efficacité dans tous les secteurs énergétiques, remplacement des agents énergétiques fossiles par des sources d'énergie renouvelables pour le chauffage et la mobilité à courtes distances, production d'électricité à partir de sources émettant peu de CO₂) est en principe réalisable sur le plan technologique et supportable sur le plan économique. Ainsi la trajectoire A (objectif de réduction des émissions de CO₂ de 65% d'ici 2050) est caractérisée par un taux de croissance annuel de 1,29%. La trajectoire B (objectif climatique + sortie du nucléaire) s'accompagne dès lors d'un léger recul de la croissance annuelle de l'ensemble de l'économie de 1,29 à 1,24%. Le niveau de revenu de 2050 de la trajectoire A est atteint avec un an de retard environ dans la trajectoire B, c'est-à-dire avec une sortie du nucléaire. Simultanément, elle souligne que jusqu'au milieu du siècle environ, la transformation du système énergétique en faveur de la durabilité n'ira pas de soi. Outre des améliorations technologiques induites par la recherche, un tel objectif nécessite des mesures de politique énergétique respectant les principes du marché reposant sur la vérité des coûts et tenant compte de toutes les externalités. De plus, ces mesures devraient être axées sur le long terme et être bien coordonnées au sein de l'Etat fédéral, afin de créer des conditions cadre fiables pour tous les acteurs concernés.

2.4. Kosten der (Nicht-)Energiewende (Meier 2013)

Données cadre	Scénario	Unité	2010	2020	2035	2050	Source	
Croissance démographique	tous	mio.	7,9	8,4	8,9	9,0	Prognos 2012 (OFS, Sc. A-00-2010)	
Croissance économique PIB, réel, 2010	tous	mrd CHF	547	618	700	801	Prognos 2012 (SECO 2010)	
Surfaces de référence énergétique	tous		Reprises en principe de Prognos (2012), mais réduction de 4% de la surface de référence énergétique des ménages privés					
Prix de l'énergie sur le marché mondial, pétrole, réel 2010	RÉFÉRENCE/TOURNANT ÉNERGÉTIQUE MODÉRÉS		Prix effectifs jusqu'en 2012 (env. 110 USD/baril), hausse relative selon Prognos 2012 dès 2013 / AIE WEO 2010 New policy (env. 130 USD/baril en 2020 et 140 USD/baril en 2030)					
	ÉLEVÉS		Prix effectifs jusqu'en 2012 (env. 110 USD/baril), 2015: 150 USD/baril, 2020: 170 USD/baril, 2030: 200 USD/baril; 2050: 210 USD/baril (AIE Annual Energy Outlook 2012 et hausse plus faible jusqu'en 2025)					
	MOYENS		Hausse jusqu'en 2020 comme entre 2000 et 2012, hausses plus modérées de 2020 à 2050 au niveau entre le scénario des prix élevés et MODÉRÉS					
	BAS		USD/baril	76	99,9	114,1	116,9	AIE WEO 2010, New policy, Prognos
Taux de change (USD/CHF)	tous		Repris de Prognos (2012)					
Taux d'intérêt	tous		2,5%					

Tableau 16: Données cadre, Meier 2013

Financée par la Fondation suisse de l'énergie (SES), cette étude a recours à SIM-ENERCO, un modèle sectoriel visant à représenter de façon sélective les activités économiques déterminantes pour la demande, l'efficacité et l'approvisionnement énergétiques, sans aborder les interactions avec d'autres secteurs économiques et sans faire le lien avec l'économie dans son ensemble. Elle élabore différents scénarios sur la demande et l'approvisionnement énergétiques, ainsi que sur les coûts afférents pour la période 2000 à 2050. Les coûts des consommateurs finaux de l'énergie sont à considérer comme les coûts de l'approvisionnement. L'étude ne traite pas des incidences sur l'ensemble de l'économie, mais démontre que, à supposer que les prix des agents énergétiques fossiles augmentent durant les prochaines décennies, même de façon modérée, l'absence de tournant énergétique pourrait vite coûter très cher. L'étude critique le fait que la hausse des prix du pétrole est à peine prise en compte dans les débats, alors même que la dépendance aux agents fossiles constitue un facteur de risque économique. Un tournant énergétique peut réduire considérablement les sorties d'argent liées aux importations d'agents énergétiques et transférer une partie de ces dépenses en Suisse, ce qui, outre la baisse des coûts, peut générer un potentiel significatif en termes de création de valeur et d'emploi. Le tournant énergétique peut également être considéré comme une assurance, à laquelle il vaut déjà la peine de souscrire lorsque la probabilité d'un sinistre sous forme d'une hausse des prix des combustibles fossiles est faible.

L'étude présente deux scénarios principaux avec des prix énergétiques modérés: RÉFÉRENCE et TOURNANT ÉNERGÉTIQUE, inspirés des scénarios PPA et NPE de la Confédération. Les données cadre socio-économiques (croissance démographique, PIB) ainsi que l'évolution des surfaces de référence énergétiques et des prestations de transport sont tirées des Perspectives énergétiques de la Confédération. De plus, l'étude procède à des analyses de sensibilité avec, à la clé, des scénarios misant sur des prix de l'énergie bas, moyens et élevés, ainsi que sur des hypothèses alternatives sur le développement de la production d'électricité solaire et la suffisance. Les résultats de l'étude montrent qu'en cas d'évolution modérée des prix des agents énergétiques fossiles, en comparaison du scénario RÉFÉRENCE, le TOURNANT ÉNERGÉTIQUE générerait des coûts supplémentaires jusqu'à la fin des années 2030, avant de permettre de réaliser des économies. De 2015 à 2050, les coûts supplémentaires du TOURNANT ÉNERGÉTIQUE représentent en moyenne 361 millions de Francs Suisses par année, soit 41 francs par personne et par année ou moins de 1% des coûts totaux de l'approvisionnement énergétique chiffrés à 40 milliards. Dans un scénario aux prix élevés par contre, le TOURNANT ÉNERGÉTIQUE s'avère économiquement avantageux dès les premières années déjà, les économies s'élevant en moyenne à 374 francs par personne et par an.

2.5. Energiestrategie 2050: eine institutionelle und ökonomische Analyse (IWSB, Borner et al., 2014)

Cette étude n'est pas basée sur un modèle; elle porte sur les faisabilités technique, économique et institutionnelle de la Stratégie énergétique 2050. Elle analyse les coûts générés par l'adaptation de l'approvisionnement énergétique en se concentrant sur les investissements requis, sans chiffrer les conséquences macroéconomiques sur la croissance, la prospérité, etc.. Les auteurs en concluent que la Stratégie énergétique (les hypothèses liées au développement des énergies renouvelables sont tirées du scénario PCF, variante ER) nécessiterait des investissements supplémentaires de plus de 100 milliards de francs. Les auteurs attribuent une grande partie de ces investissements (environ

60 milliards de francs) à la production à partir de sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, leurs calculs se basent essentiellement sur le développement des énergies renouvelables tel qu'il est visé par la Stratégie énergétique 2050, sur les coûts actuels des installations éoliennes et photovoltaïques, ainsi que sur la puissance nominale requise pour garantir un courant électrique défini. Lorsqu'il s'agit de déterminer les coûts, les auteurs partent du principe que la production issue des installations éoliennes et photovoltaïques doit être intégralement conservée, d'où un immense besoin de capacités de stockage onéreuses (investissements requis: 33 milliards de francs). Se fondant sur Consentec (2012), les auteurs estiment que l'adaptation et le développement des réseaux coûteront quelque dix milliards de francs. Enfin, dans l'hypothèse où le soleil et le vent ne produisent aucune énergie au moment où la demande est la plus forte, la capacité de réserve doit atteindre 4MW, ce qui engendre des coûts d'environ six milliards de francs pour les centrales à cycle combiné (CCC).

Hypothèses liées aux conditions cadre:

L'étude n'étant pas basée sur un modèle, elle n'émet aucune hypothèse explicite sur les conditions cadre (croissance démographique, hausse du PIB, prix de l'énergie, du CO₂ et taux de change). Les hypothèses concernant le développement des énergies renouvelables sont reprises du scénario PCF, variante ER.

2.6. Energiewende in der Schweiz: Simulationsergebnisse zur Energiestrategie des Bundes KOF ETH 2013 (Egger et Nigai, 2013)

Sur mandat de l'association économique faîtière des entreprises suisses economiesuisse, le Centre de recherches conjoncturelles (KOF) de l'EPF a analysé la Stratégie énergétique de la Confédération sur la base d'un modèle mondial. La valeur d'un tel modèle réside notamment dans la modélisation des interdépendances des économies résultant du commerce de marchandises transfrontalier, et dans celle de l'offre et de la demande dans les domaines de l'énergie, des marchandises et des services (quantités et prix) en tant que facteurs endogènes. Il s'agit d'un modèle statique; les résultats montrent donc combien de progrès techniques supplémentaires le tournant énergétique devrait générer afin de compenser ses coûts. Quatre scénarios de principe sont modélisés. Le premier simule la réalisation des engagements découlant de l'accord de Copenhague. Les trois autres scénarios simulent des mesures complémentaires dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050. Premièrement: l'instauration d'un impôt implicite de 1140 francs par tonne d'émissions de CO₂; deuxièmement: en outre, le remplacement intégral de l'énergie nucléaire produite en Suisse par le gaz; et troisièmement: la substitution partielle de l'offre d'énergie nucléaire par des agents énergétiques alternatifs. Ces quatre scénarios sont appliqués avec quatre configurations différentes sur le plan de la coordination internationale de la politique énergétique.

Selon les auteurs, l'ampleur des incidences dépend du degré d'ambition des objectifs, de l'importance des progrès technologiques et de la question de savoir si l'économie dispose de suffisamment de temps pour s'adapter. D'après eux, si les engagements définis dans l'accord de Copenhague sont traduits dans les faits (réduction des émissions de CO₂ de quelque 23% d'ici 2020 par rapport à l'an

2000), l'abandon du nucléaire ne générera pas de coûts supplémentaires pour la Suisse. Dans l'ensemble cependant, il s'avère que les incidences purement économiques de la politique climatique visée peuvent pour certaines être considérables (selon le scénario, les conséquences sur le PIB réel de la Suisse peuvent atteindre jusqu'à -23,5%). D'autre part, pour que la politique énergétique planifiée soit supportable sur le plan économique - comme sur le plan politique - elle nécessite des changements technologiques majeurs.

Dans sa réponse à l'interpellation 13.3018, le Conseil fédéral a relevé que le modèle était statique, qu'il recourait aux structures économiques de l'an 2000, et qu'il prévoyait de plus d'introduire une taxe élevée sur le CO₂ en une seule étape. Cependant, l'étude KOF confirme le résultat de l'étude d'Ecoplan, selon lequel les défis de la politique énergétique et climatique nécessitent une évolution considérable sur le plan technique.

Hypothèses liées aux conditions cadre:

Le modèle se réfère à l'année de base 2000. Il s'agit d'un modèle statique; autrement dit, il n'émet aucune hypothèse sur l'évolution des conditions cadre et se fonde uniquement sur des valeurs observées durant l'année de base. Tous les changements simulés de mesures économiques dans le cadre de la mise en œuvre d'instruments de politique énergétique relèvent par conséquent de données (observées) durant l'an 2000.

2.7. Energy [r]evolution (Greenpeace, 2013)

Données cadre	Scénario	Unité	2010	2020	2035	2050	Source
Croissance démographique	E[R]	mio.	7,9	8,4	8,9	9,0	Prognos 2012
Croissance économique PIB, réel, 2010	E[R]	mrd CHF	547	618	700	801	Prognos 2012
Importations de pétrole brut, prix 2010	E[R]	€/ baril	65	93	126	126	Propres hypothèses
Importations de gaz, Europe, prix 2010	E[R]	€/ GJ	9,6	15,8	19,6	24,6	Propres hypothèses
Importations de charbon OCDE	E[R]	€/ tonne	81,9	115	150	170,7	Propres hypothèses
OCDE Europe biomasse solide	E[R]	€/ GJ	6,5	7,7	8,5	8,8	Propres hypothèses
Coûts émissions CO ₂ , prix 2010	E[R]	€/ tonne	0	19	p. d.	57	Propres hypothèses

Tableau 17: Données cadre, Greenpeace 2013 (p. d. = pas de données)

L'étude «energy[r]evolution» présentée par Greenpeace a été élaborée à l'aide d'un modèle du groupe d'analyse système à l'Institut des techniques thermodynamiques du Centre aérospatial allemand (*Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt*); ce modèle a été adapté pour la Suisse. Dans le scénario adopté par e[r], la durée de vie des centrales nucléaires est limitée à quarante ans. Dans le même temps, il table sur une baisse des émissions de CO₂ de 96% d'ici 2050 par rapport à 1990. Le scénario e[r] est donc un scénario d'objectifs dans lequel la demande d'énergie diminue de quelque 50% à l'horizon 2050 par rapport à 2010; autrement dit, elle est inférieure d'environ 9% à celle prévue dans le scénario NPE de Prognos, 2012. Les croissances démographique et économique sont les mêmes que dans les Perspectives énergétiques 2050 de l'OFEN. Dans le domaine des combustibles fossiles, l'évolution des prix prévue

est un peu plus marquée que dans le modèle «Politique actuelle» du World Energy Outlook (WEO) 2011 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Pour atteindre les objectifs fixés dans l'étude, le scénario mise notamment sur l'introduction d'une redevance sur le CO₂ pour les combustibles et les carburants, sur une taxe incitative sur l'électricité ou l'énergie, sur la définition d'un cadre légal assorti d'objectifs d'efficience contraignants pour les fournisseurs d'énergie. Dans l'étude, un scénario sobriété/suffisance est également présenté dans lequel toutes les incitations à un comportement non suffisant, comme par exemple les transports aériens trop bon marché, le développement continu du réseau routier, sont écartées à moyen terme.

La production d'électricité dans le scénario e[r] se base sur le mix électrique «100PRO» proposé par les organisations écologiques suisses; ce mix propose de renoncer au gaz naturel, d'augmenter rapidement la production photovoltaïque, d'autoriser les importations et de renoncer à une forte expansion de l'hydraulique. Des modélisations se fondant sur des données météorologiques ont été effectuées à l'aide du modèle d'approvisionnement en électricité de la société Supercomputing Systems SA (SCS). Certains aspects de la sécurité d'approvisionnement et de la structure décentralisée de l'alimentation et des réseaux électriques sont abordés de manière qualitative. Les coûts et les avantages liés à la transition énergétique sont tirés des travaux de Swisscleantech. Les investissements requis pour la transformation de la production d'électricité et de chaleur, de même que les incidences sur l'emploi, ont été quantifiés dans les grandes lignes par le DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) et par un institut à Sydney.

Résultats principaux	Scénario	Unité	2010	2020	2030	2040	2050
Consommation finale d'énergie totale	E[R]	PJ/a	859	740	602	510	447
Consommation finale d'électricité	E[R]	PJ/a	215	212			210
Emissions de CO ₂ par habitant	E[R]	tonnes	5.6	3.8	2.2	0.9	0.2

Tableau 18: Résultats principaux, Greenpeace 2013

La demande en énergie recule dans le scénario E[R] pour atteindre environ 450 PJ/a en 2050, soit environ 53% de moins qu'en 2010. Dans une variante „sobriété“ la demande d'énergie finale recule encore de 11% pour atteindre 400 PJ/a. Dans le scénario E[R], la demande en électricité reste à son niveau actuel. La demande en électricité baisse dans les secteurs des ménages, de l'industrie et des services mais augmente fortement dans le secteur des transports. L'étude table sur une meilleure efficacité énergétique dans le domaine de la demande en chaleur que dans celui de la demande en électricité.

Des investissements pour le renouvellement des capacités de production à hauteur d'environ 88 milliards de francs sont nécessaires entre 2011 et 2050 (y compris les investissements pour le remplacement de centrales après l'expiration de leur durée de vie économique). En outre, selon l'étude, des investissements à hauteur de 64,5 milliards de francs sont attendus entre 2011 et 2050 pour les énergies renouvelables dans le domaine du chauffage.

En appliquant des chemins de prix plutôt modérés pour les énergies fossiles importées et en tenant compte d'effets positifs indirects, il résulte, selon l'étude, des effets sur le bien-être d'un ordre de grandeur de +2 % à - 0,42 %.

2.8. Stratégie énergétique Cleantech 4.0 (Cleantech, 2014)

Données cadre	Scénario	Unité	2010	2020	2035	2050	Source
Croissance démographique		Mio.	7.8	8.4	8.8	9.0	OFS
Croissance économique PIB		Jährliche Zuwachsrate von 1.2%					Seco 2011
Superficie chauffée		Progression de 20% d'ici 2050					
Transport des personnes	Pers. km	Progression de 20% d'ici 2050					
Transports publics		A l'avenir, 20% supplémentaires du transport individuel motorisé actuel seront assurés par les transports publics.					
Transport des marchandises	t. km	Augmentation de 40% d'ici 2050					
Processus industriels		Augmentation modérée de la production de 10%					

Tableau 19: Données cadre, Cleantech 2014

La stratégie énergétique Cleantech se fonde sur le modèle énergétique Cleantech. L'année de base servant à la représentation est 2010. Certaines hypothèses du modèle et une délimitation précises entre données cadre exogènes et endogènes ne sont pas publiées dans le rapport.

Principaux résultats	Unité	2010	2020	2030	2040	2050
Consommation finale d'énergie	TWh	230.3	202.4	172.6	143.8	116.2
Consommation d'électricité	TWh	60	66	72	72	70
Emissions de CO ₂ (Base 1990) Réduction dans le pays	%	3.6	23.1	48.5	68.2	88.8

Tableau 20: Résultats principaux, Cleantech 2014

Les principaux paramètres de l'évolution des besoins (demande en énergie) et potentiels d'efficacité sont présentés dans l'étude. La consommation pour le chauffage diminue de 75%, la réduction de la consommation pour le transport des personnes (transport individuel motorisé) est de 60%, pour le transport de marchandises, elle est de 45%. Une optimisation substantielle des sites de production doit permettre une réduction de 20% de l'utilisation de la chaleur dans l'industrie. Dans le domaine des moteurs, appareils et TIC la réduction de la consommation doit atteindre 35%.

Un but de la stratégie est la réduction des émissions de tous les gaz à effet de serre à 1 tonne d'équivalent CO₂ par personne et par an maximum en 2050 ainsi qu'une production d'électricité provenant à 100% de sources renouvelables. Dans ses calculs, l'étude utilise l'approche des coûts globaux. Selon le rapport, les coûts supplémentaires se montent selon le scénario envisagé au maximum entre 50 et 100 milliards de francs jusqu'en 2050. Les conséquences de la stratégie énergétique Cleantech pour l'économie suisse ont été calculées par le CER de l'EPFZ. Les résultats de l'étude montrent que pour les scénarios examinés, parmi lesquels la Stratégie énergétique Cleantech, les répercussions délétères sur le bien-être se monteront au maximum à 0,4% par rapport au scénario du statu quo.

3. Bibliographie

- Cleantech 2014 swisscleantech, Stratégie énergétique Cleantech, version 4.0, novembre 2014
- EBP 2012a Ernst Basler + Partner, Stromeffizienz und Nachfrageflexibilisierung in Industrie und Dienstleistungen, Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE/AES), Aarau, 2012
- EBP 2012b Ernst Basler + Partner, Effizienz und Elektrifizierung Haushalte 2012, Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE/AES), Aarau, 2012
- EBP 2012b Ernst Basler + Partner, Effizienz und Elektrifizierung Haushalte 2012, Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE/AES), Aarau, 2012
- Ecoplan 2012 Ecoplan, Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Schlussbericht, September 2012
- ETH 2011 Andersson Göran, Boulouchos Konstantinos und Bretschger Lucas, Energiezukunft Schweiz, ETH Zürich, November 2011
- Greenpeace 2013 Greenpeace, Energy [r]evolution - un approvisionnement énergétique durable pour la Suisse, novembre 2013
- IWSB 2014 S. Borner, D. Hauri, B. Wyss, B. Schips & M. Saurer: Energiestrategie 2050: eine institutionelle und ökonomische Analyse.
- KOF-ETH 2013 P. Egger, S. Nigai, Energiewende in der Schweiz: Simulationsergebnisse zur Energiestrategie des Bundes, KOF Studien, 38, Zürich, Januar 2013
- Meier 2013 B. Meier. Kosten der (Nicht-)Energiewende. Studie im Auftrag der Schweizerischen Energie-Stiftung SES, 17. Juni 2013, Winterthur.
- Pöyry 2012 Pöyry Management Consulting. Angebot und Nachfrage nach flexibler Erzeugungskapazität in der Schweiz. Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE/AES), Aarau, 2012
- Prognos 2012 Prognos AG / BFE, Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Basel, September 2012
- AES 2012 Association des entreprises électriques suisse (AES), Scénarios pour l'approvisionnement électrique du futur, rapport global, Aarau, 2012