Urgence climatique : quelle contribution de l'éolien ?

Département F.-A. Forel des Sciences de l'environnement et de l'Eau

UNI-GE – 25 mars 2021

1. **Urgence climatique: la nécessaire transition énergétique**
2. **Energie, électricité, éolien: Monde, Europe, Suisse**
3. **Eolien: impacts globaux, impacts locaux**
4. **Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?**
5. **Et en Suisse ?**

https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/

Jean-Luc Zanasco - responsable développement éolien SIG et directeur ennova SA

GREE – Groupement romand pour l'énergie éolienne

«Entreprises et distributeurs d'électricité qui développent la production d'énergies renouvelables, conformément au mandat reçu des autorités publiques à travers la Stratégie énergétique 2050»

SIG – société de droit public autonome: Etat, communes et Ville de Genève

- Electricité: distribution (2.7 TWh), production (0.8 TWh), économie éco21 (205 GWh), chaleur à distance, réseau de gaz naturel, traitement des déchets (220 kT), eau potable (51 Mm^3) et eaux usées (73 Mm^3), programme GEothermies
- ~1700 employés - chiffre d'affaire ~1 milliard CHF

1. Urgence climatique: la nécessaire transition énergétique

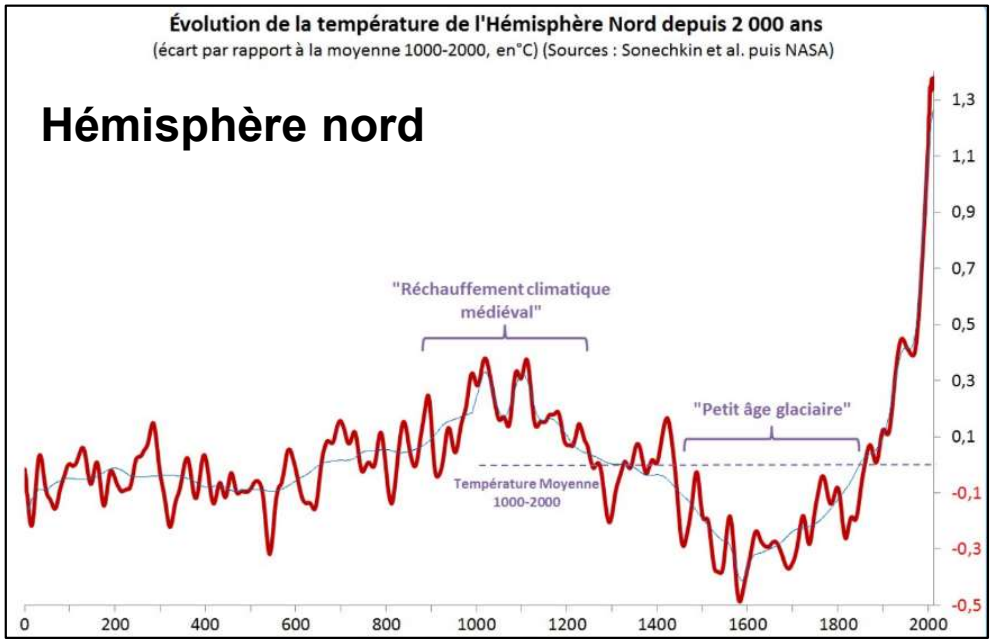
Urgence climatique: la nécessaire transition énergétique

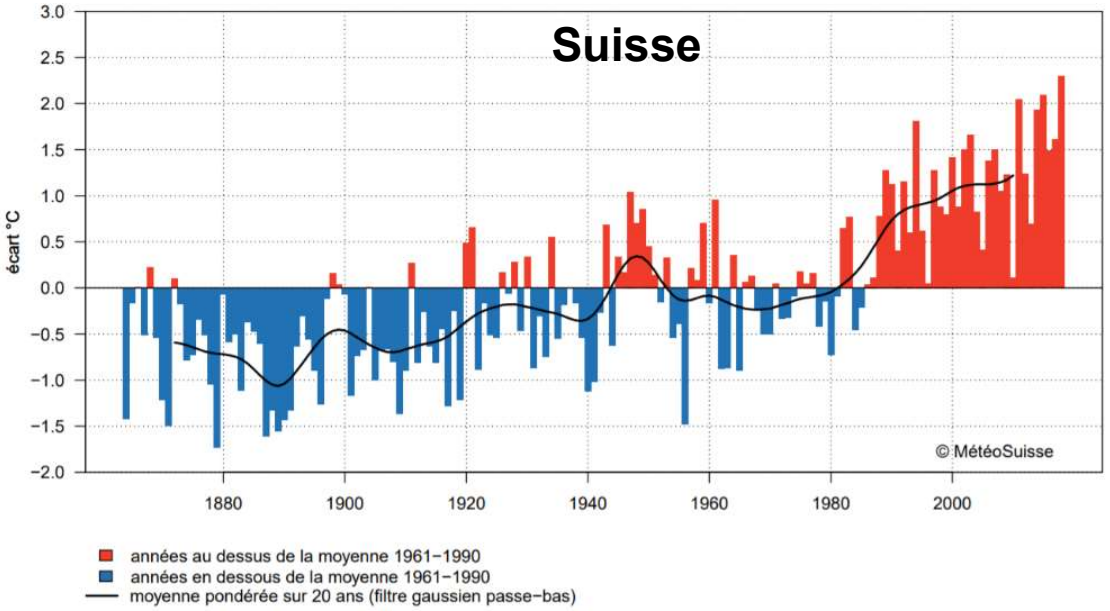
Augmentation de la température moyenne

	Augmentation °C
Monde	+ 1
Hémisphère nord	+ 1.3
Suisse	+ 2

Le forçage radiatif de 2.3 W/m² conduit à un supplément d'énergie:

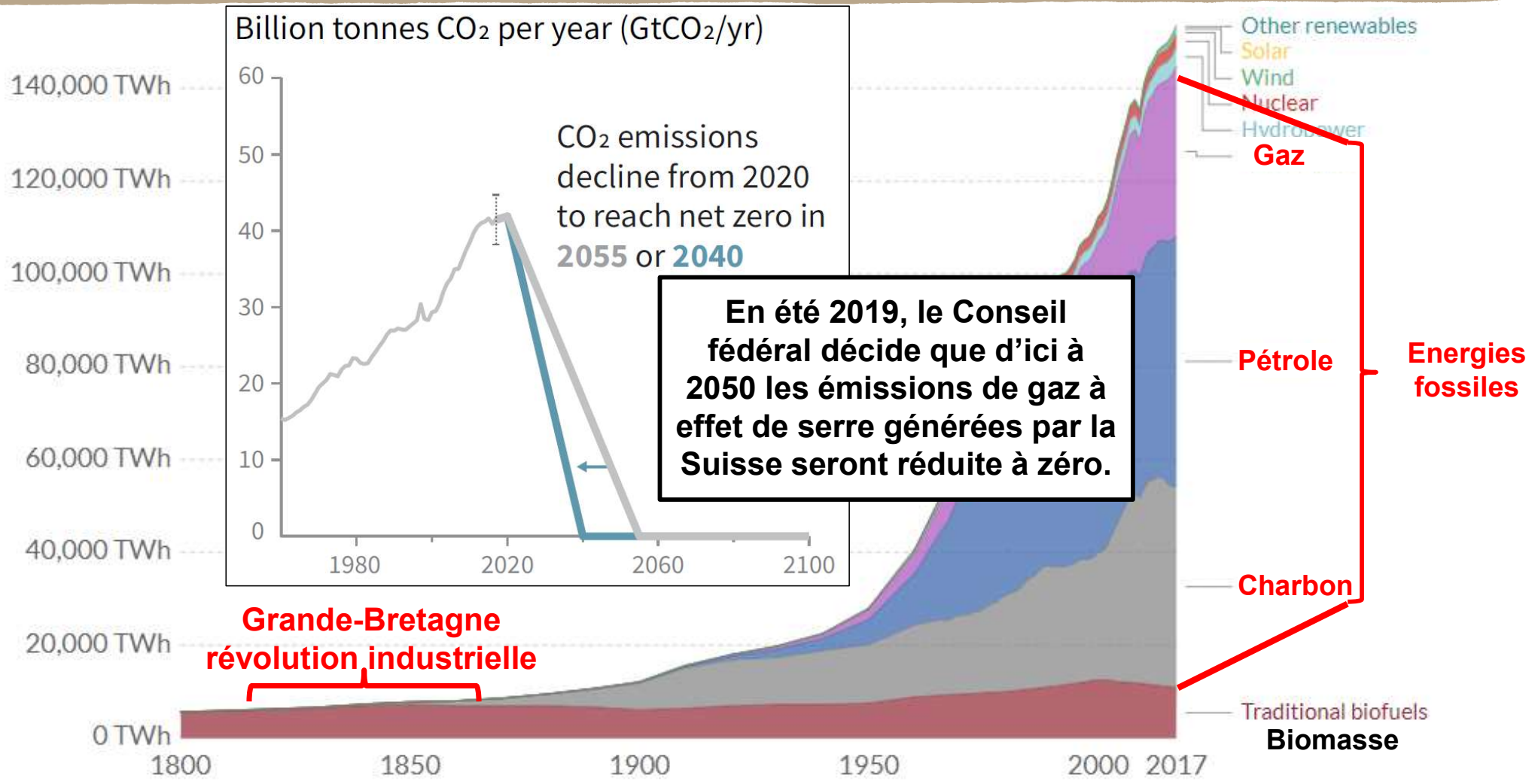
- **2% dans l'atmosphère**
- **3% pour la fonte des glaces**
- **5% dans les sols**
- **90% dans les océans**





Urgence climatique: la nécessaire transition énergétique

Consommation énergétique et accord de Paris: max. +2 °C



Urgence climatique: la nécessaire transition énergétique

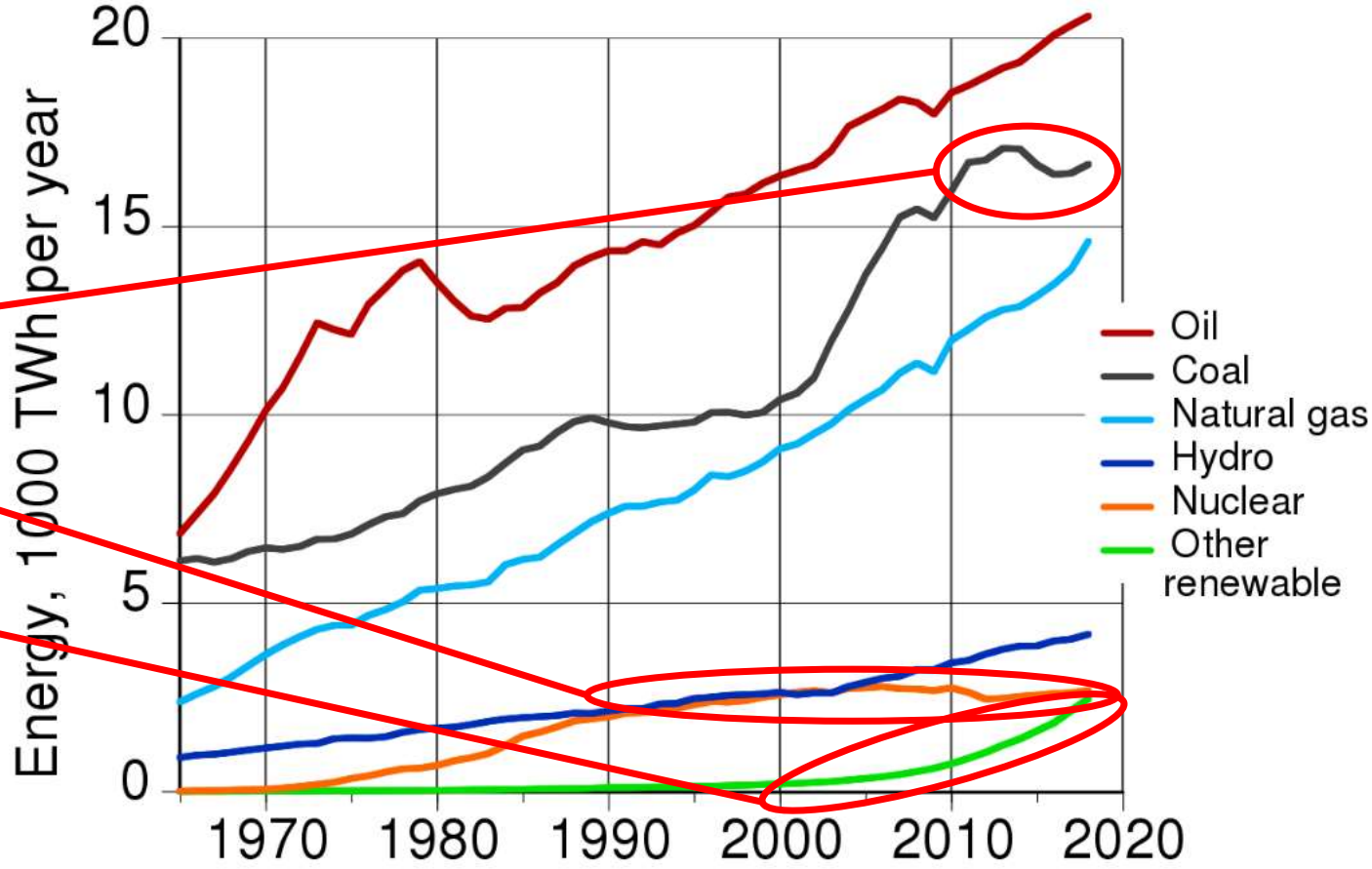
Conséquences: différences entre 1.5 °C et 2 °C

Augmentation de la température moyenne planétaire (depuis l'ère préindustrielle)	1.5 °C	2 °C
Banquise Arctique: fonte totale estivale	une année sur 100	au min. une année sur 10
Récifs coraliens tropicaux: dégradation sévère	70 à 90%	près de 100%
Population atteinte par des vagues de chaleur (Byers *et al.* 2018)	4 milliards	6 milliards

2. Energie, électricité, éolien: Monde, Europe, Suisse

Consommation énergétique mondiale

- **Depuis 30 ans ~80% de fossiles (renouvelable 17% en 1990 à 18% en 2018)**
- **Amorce d'une stabilisation du charbon**
- **Stabilisation du nucléaire**
- **Depuis l'an 2000, dévelop-pement des NER**



Energie, électricité, éolien: Monde, Europe, Suisse

Production d'électricité en 2019

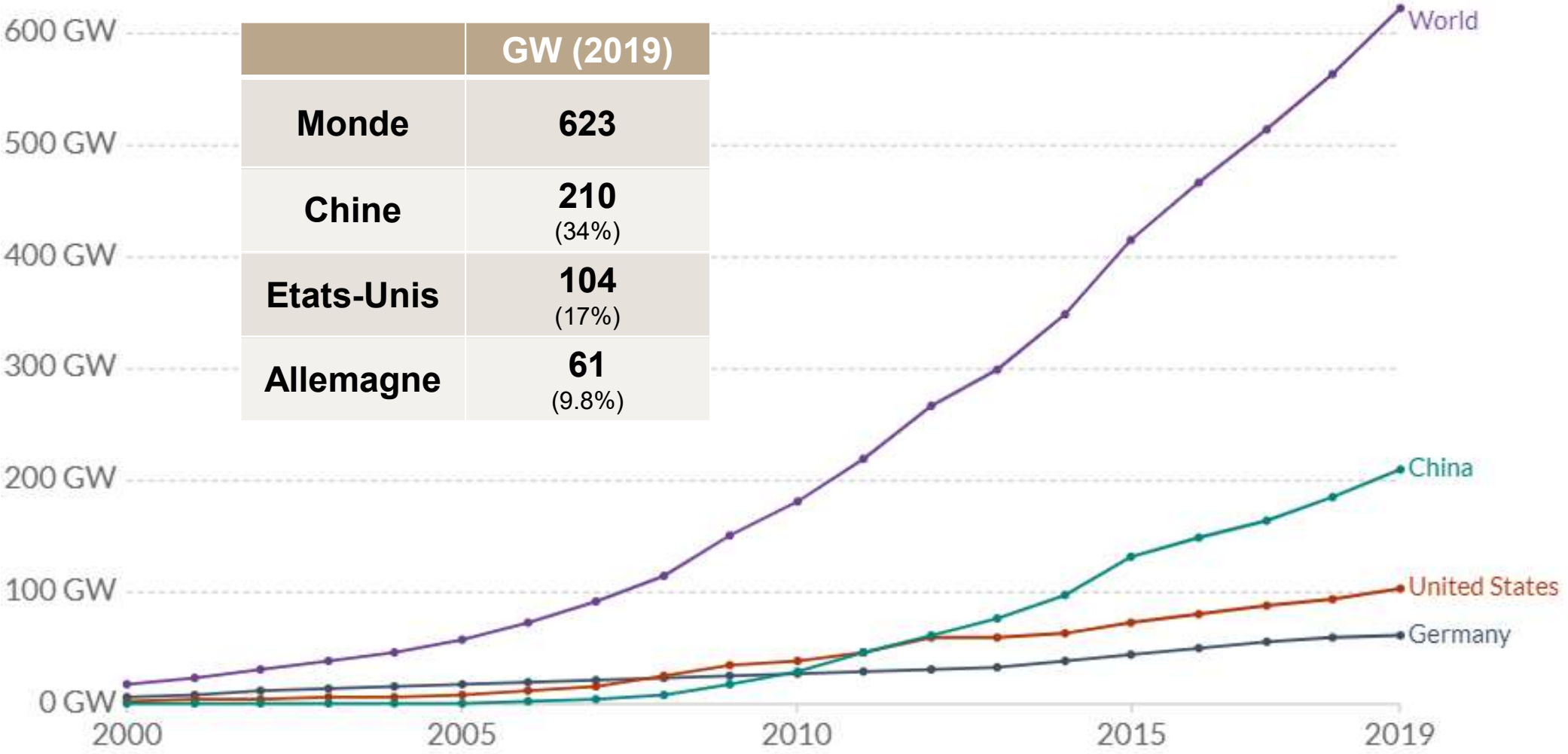
Monde 2019 (AIE) Sources	Production TWh	%
Charbon	9'849	37
Gaz naturel	6'317	23
Hydroélectricité	4'305	16
Nucléaire	2'789	10
Eolien	**1'423** 623 GW	**5.3%**
Pétrole	785	2.9
Biomasse + déchets	667	2.5
Solaire	665	2.5
Total	**≈ 27'000**	

UE-28		CH	
426 192 GW	>14%	0.13 0.08 GW	0.2%

Energie, électricité, éolien: Monde, Europe, Suisse

Puissance éolienne installée mondiale de 2000 à 2019 (GW)

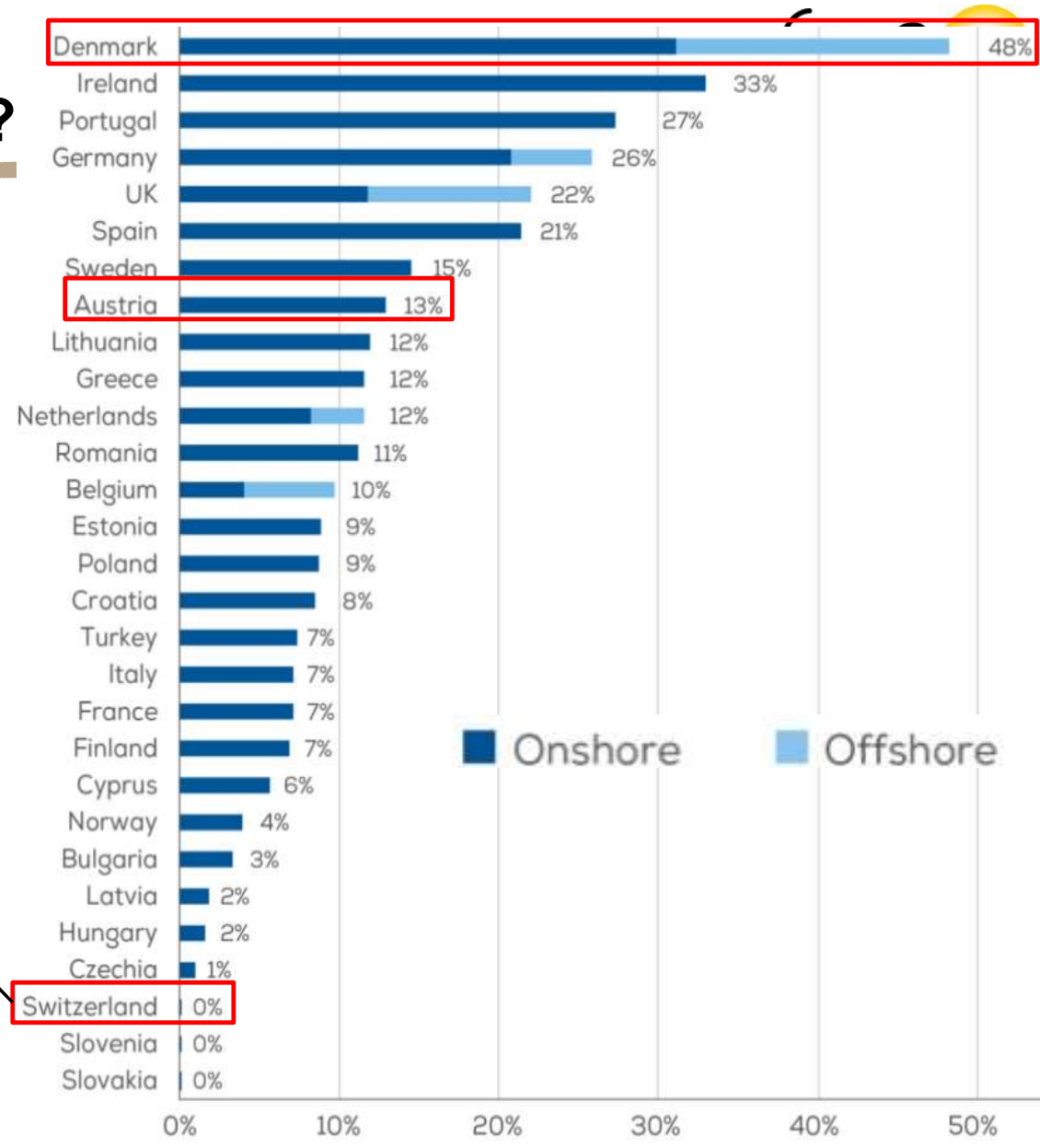
	GW (2019)
Monde	**623**
Chine	**210** (34%)
Etats-Unis	**104** (17%)
Allemagne	**61** (9.8%)



Monde, Europe, Suisse

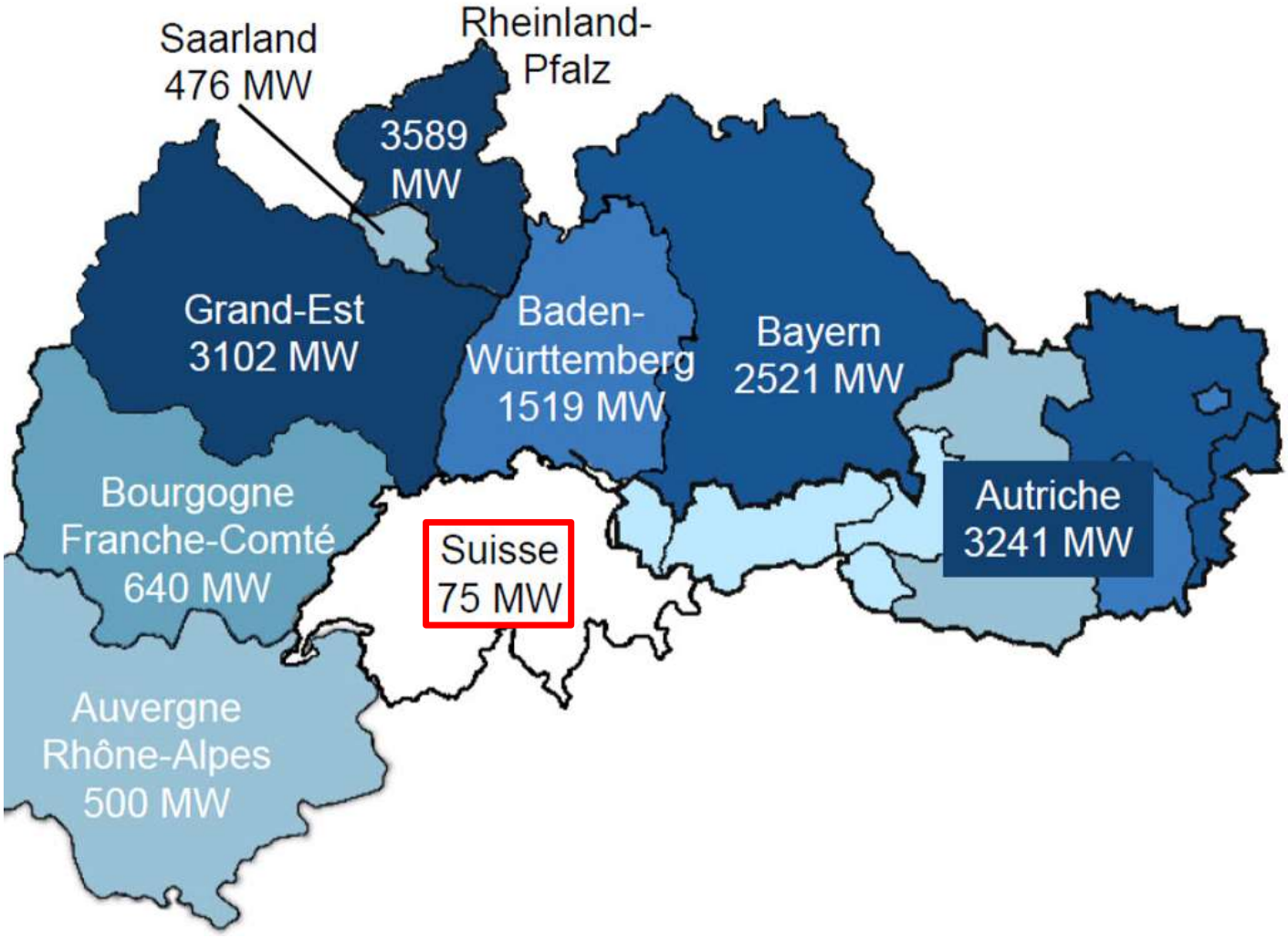
L’éolien en Europe… et la Suisse ?

Pays	% électricité éolienne (2019)
Danemark	48%
Autriche	13%
Suisse	0.2%
UE-28 (moy.)	15%



Energie, électricité, éolien: Monde, Europe, Suisse

Qu'en est-il des régions et pays proches de la Suisse?

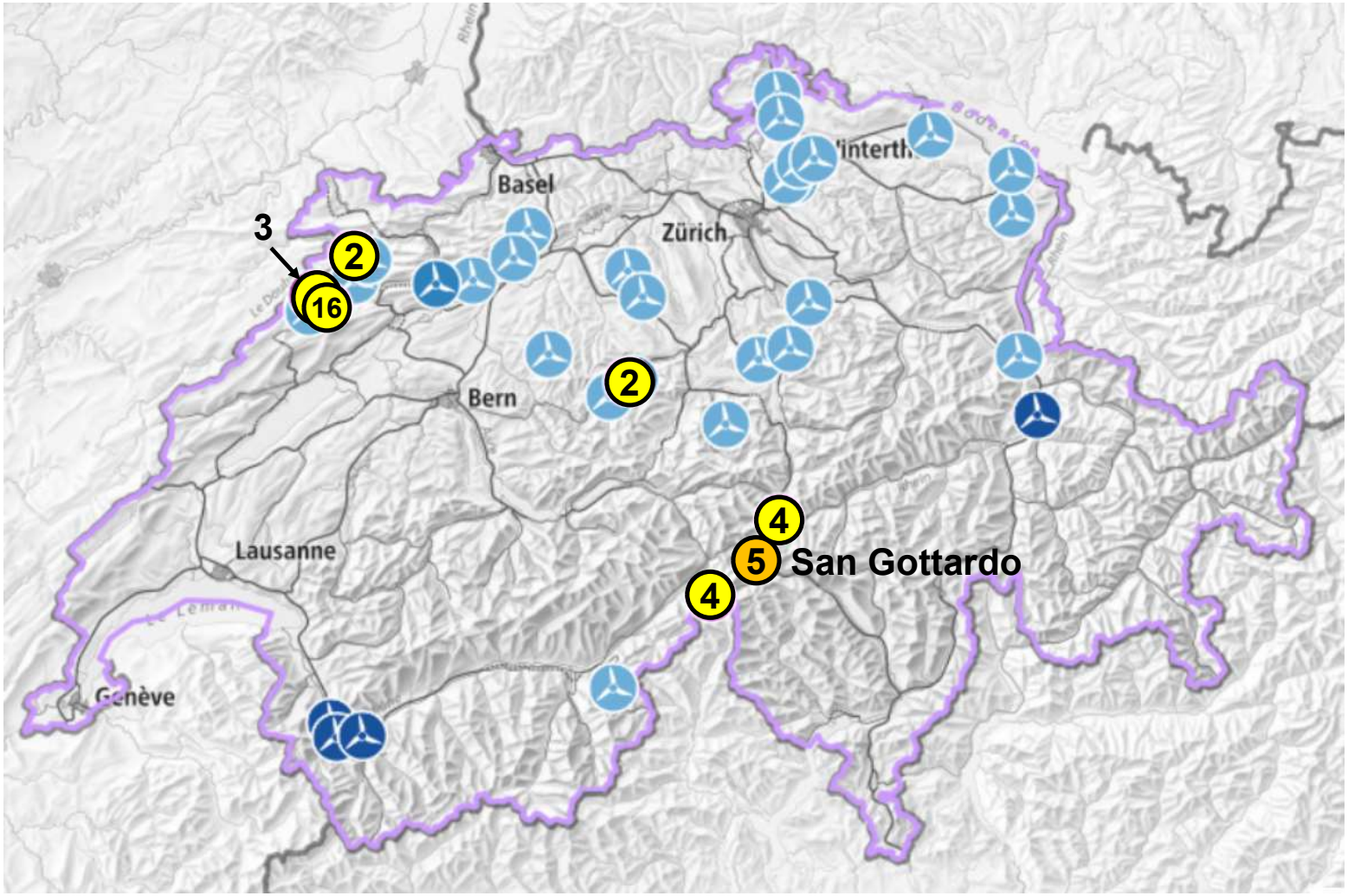


	kW/km²
Saarland	185
Rheinland-Pfalz	181
Grand-Est	54
Baden-Würtemberg	42
Autriche	39
Bayern	36
Bourgogne-Franche-C.	13
Auvergne-Rhône-Alpes	7
Suisse	2

état en 2018

Energie, électricité, éolien: Monde, Europe, Suisse

Les parcs éoliens



- Petite installation indépendante
  Puissance < 100 kW
- Installation indépendante moyenne
  Puissance ≥ 100 kW et < 1000 kW
- Grande installation indépendante
  Puissance ≥ 1000 kW
- Parc éolien

37 éoliennes

+ 5 construction achevée à fin 2020

2019: 75 MW - 132 GWh

0,2% de l'électricité consommée en Suisse

3. Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Analyse du cycle de vie (ACV) ou Life cycle assessment (LCA)

« L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation normalisée permettant de réaliser un bilan environnemental multicritères et multi-étapes d'un système (produit, service, entreprise ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie.

Son but est de connaître et de pouvoir comparer les impacts environnementaux d'un système tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage...), en passant par ses phases d'usage, d'entretien et de transport. »

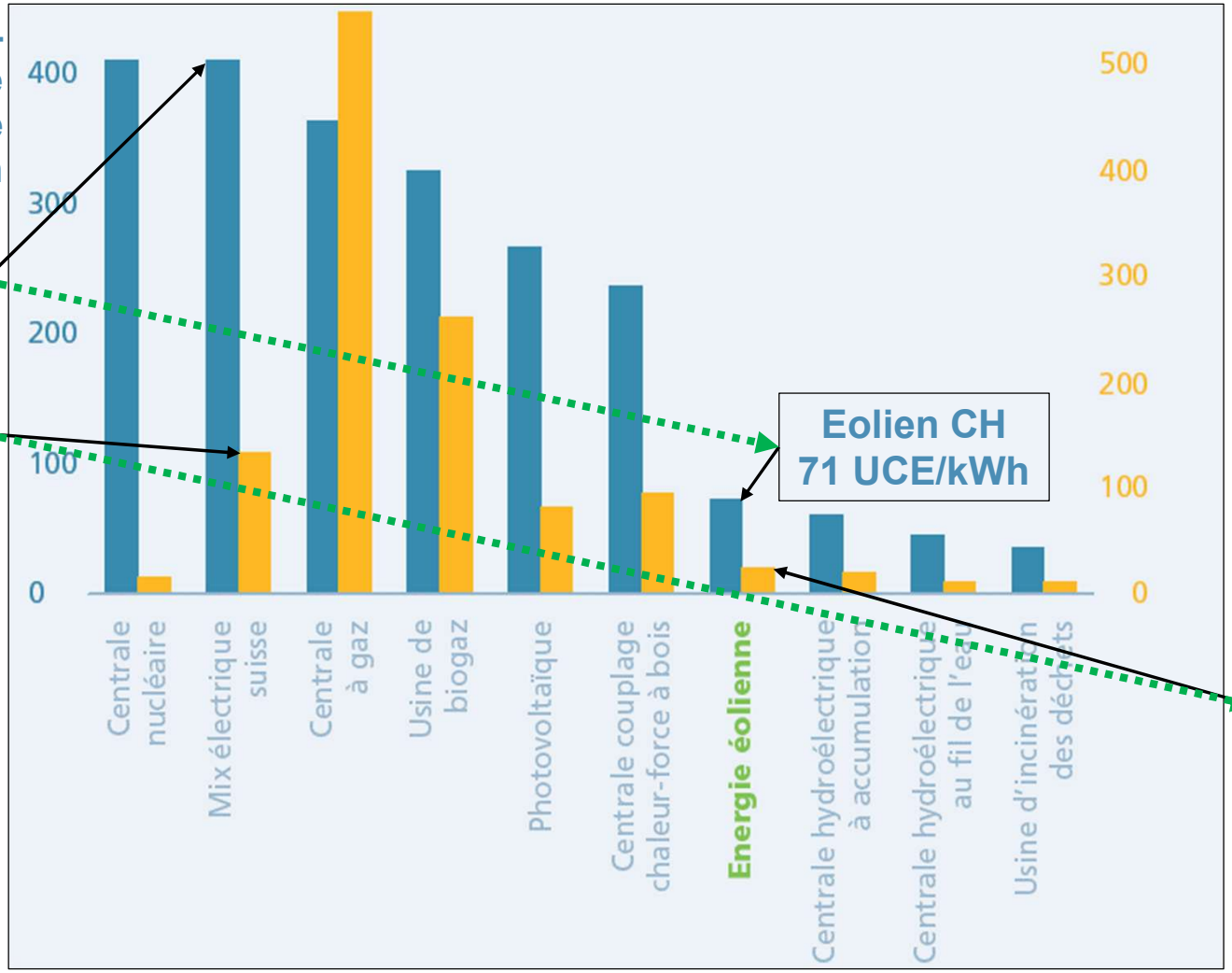
Tiré de Wikipédia

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Impacts globaux: UCE et gaz à effet de serre (g éq. CO_2 / kWh)

Impact global sur l'environnement en unité de charge écologique UCE par kWh

Potentiel de réchauffement en g. équivalent CO_2 par kWh



Mix électrique CH
407 UCE/kWh

Mix électrique CH
133 g éq. CO_2/kWh

Eolien CH
71 UCE/kWh

Eolien CH
15-25 g éq. CO_2/kWh

5 à 10x moins d'atteintes globales

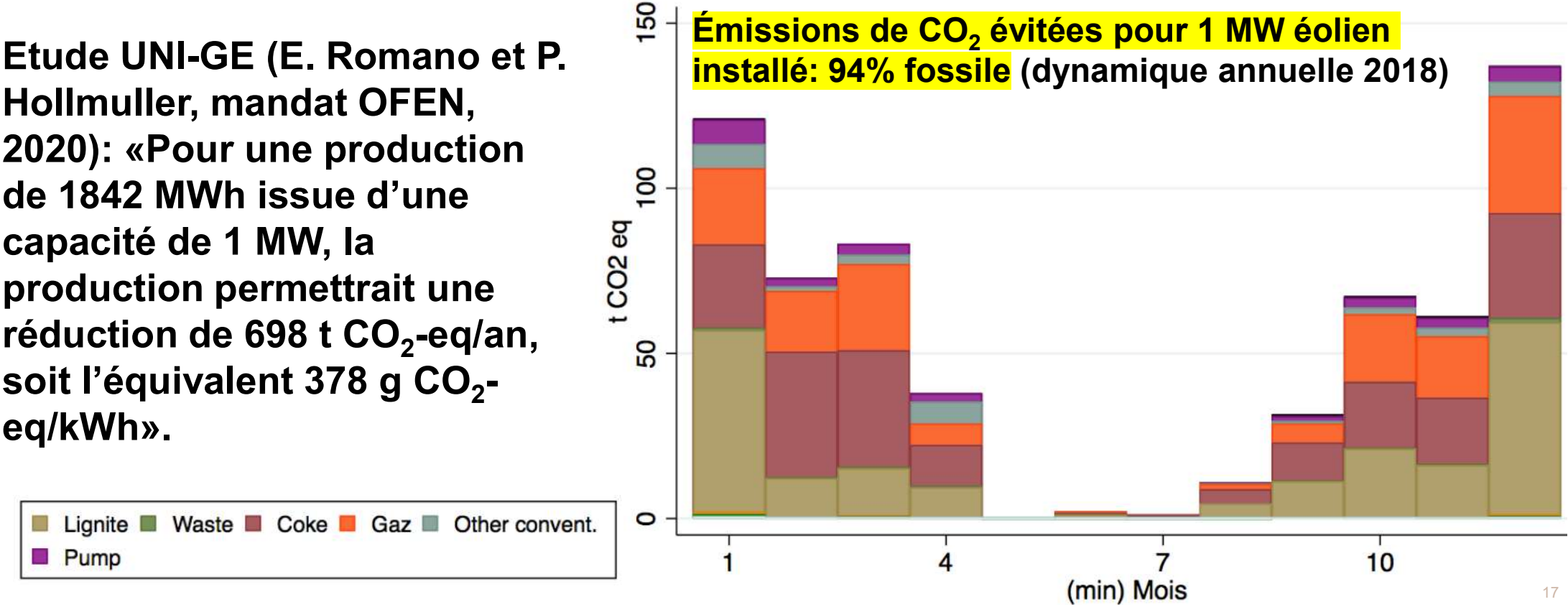
OFEN 2019
(UCE: OFEV)

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

«Dynamique»: quel impact sur le CO_2 d'un MW éolien de plus en CH ?

- **Eoliennes CH: 2/3 électricité sur la période hivernale, lorsque le photovoltaïque et l'hydraulique ne produisent que peu et que la Suisse importe un courant électrique fortement carboné d'Europe.**

- **Etude UNI-GE (E. Romano et P. Hollmuller, mandat OFEN, 2020): «Pour une production de 1842 MWh issue d'une capacité de 1 MW, la production permettrait une réduction de 698 t CO_2-eq/an, soit l'équivalent 378 g CO_2-eq/kWh».**



Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Démantèlement

- **Le démantèlement des éoliennes est rapide et facile: deux a trois semaines pour une éolienne, moins d'une année pour un parc entier.**
- **Plus du 90% de la masse d'une éolienne est facilement recyclable.**
- **Les pales des éoliennes actuelles sont en fibre de verre, comme de nombreux biens (p.ex. bateaux).**
- **Devenir des pales:**
  - **Incinération comme combustible dans les cimenteries**
  - **Inclusion dans du béton**
  - **Mise en décharge**



Mobilier urbain, municipalité Willemsplein (Pays-Bas)

Impacts locaux

Les sites éoliens sont définis dans les plans directeurs des cantons. Ces sites nécessitent une EIE (étude d'impact sur l'environnement).

Impacts locaux	Mesures
Avifaune	- Prise en compte des couloirs de migrations - Restauration d'habitats
Chiroptères	- Arrêts lors des périodes critiques - Restauration d'habitats
Bruit	- Respect de l'OPB (Ordonnance protection contre le bruit)
Ombres portées	- Respect des critères de la législation allemande
Liées aux accès	- Eviter l'intensification potentielle des pratiques agricoles - Restaurations de milieux

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Oiseaux: étude spécifique *in situ* sur le parc du Peuchapatte

Parc éolien du Peuchapatte: étude sur l'avifaune (2016)
Jura, 3 x 2.3 MW, 150 m de hauteur

- **trouvé: 7 oiseaux morts par éolienne et par an**
- **extrapolé à 20 (FR 0,3 à 18,3 - E.-U. 5.2 - Canada 8.2)**
- **petites espèces volant la nuit**
- **aucun n'appartenait à une espèce menacée**

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Bécasse des bois - *Scolopax rusticola* - Liste rouge VU en Suisse



adulte © Jari Peltomäki

Taille	33-35 cm
Envergure	56-65 cm
Poids	250-420 g
Nourriture	insectes, vers
Habitat	forêt
Nidification	sol
Incubation	22 à 23 jours
Ponte	1 par an
Nb d'œufs	4
Séjour au nid	15 à 20 jours
Âge maximal	15 ans 6 mois

www.vogelwarte.ch

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Bécasse des bois - *Scolopax rusticola* - Liste rouge VU en Suisse

Menacé

- CR — En danger critique
- EN — En danger
- VU — Vulnérable
- NT — Quasi menacé
- LC — Préoccupation mineure

Statut UICN	Chasse (Ferrand, 2017)	Période
Suisse (VU) 1000 à 4000 mâles	2000 Romandie et TI	?
Allemagne (NT)	8800	2015-2016
Autriche (NT)	4500	?
Italie (LC)	105'000	2005
France (LC)	736'000	2013-2014
Bourgogne/Franche-C. Doubs	21'600 5400	idem
Europe (LC) 13.8 à 17.4 millions ind.	2 à 3 millions	/
Monde (LC)	/	/

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Bécasse des bois - *Scolopax rusticola* - Liste rouge VU en Suisse

«Evaluation des impacts résiduels cumulés des éoliennes du Jura vaudois et des régions limitrophes sur la faune ailée» (p. 32 et 33)

VD - 10 parcs (98 éoliennes) et NE - 2 parcs (35 éoliennes)

- **VD-NE: effectif 285 - 608 adultes, moy. 446**
- **taux de croissance: -9% à 3% (moy. -2% → déclin)**
- **perte d'habitat: 6.9%, soit 12.3 mâles pour 12 sites et 133 éoliennes**

- **Chasse VD-NE moy. 2009-2013: 278 ind./an (majorité en migration)**
- **«Nul ne sait si des oiseaux nicheurs indigènes (et combien) figurent parmi les bécasses prélevées.» (Mollet 2014)**

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Alouette lulu - *Lullula arborea* - Liste rouge VU en Suisse



adulte © Jari Peltomäki

Taille	14-15 cm
Envergure	27-30 cm
Poids	24-36 g
Nourriture	insectes, graines
Habitat	zone agricole, steppe rocailleuse
Nidification	sol
Incubation	14 jours
Pontes	1 à 2 par an
Nb d'œufs	3 à 4
Séjour au nid	11 à 13 jours
Âge maximal	9 ans

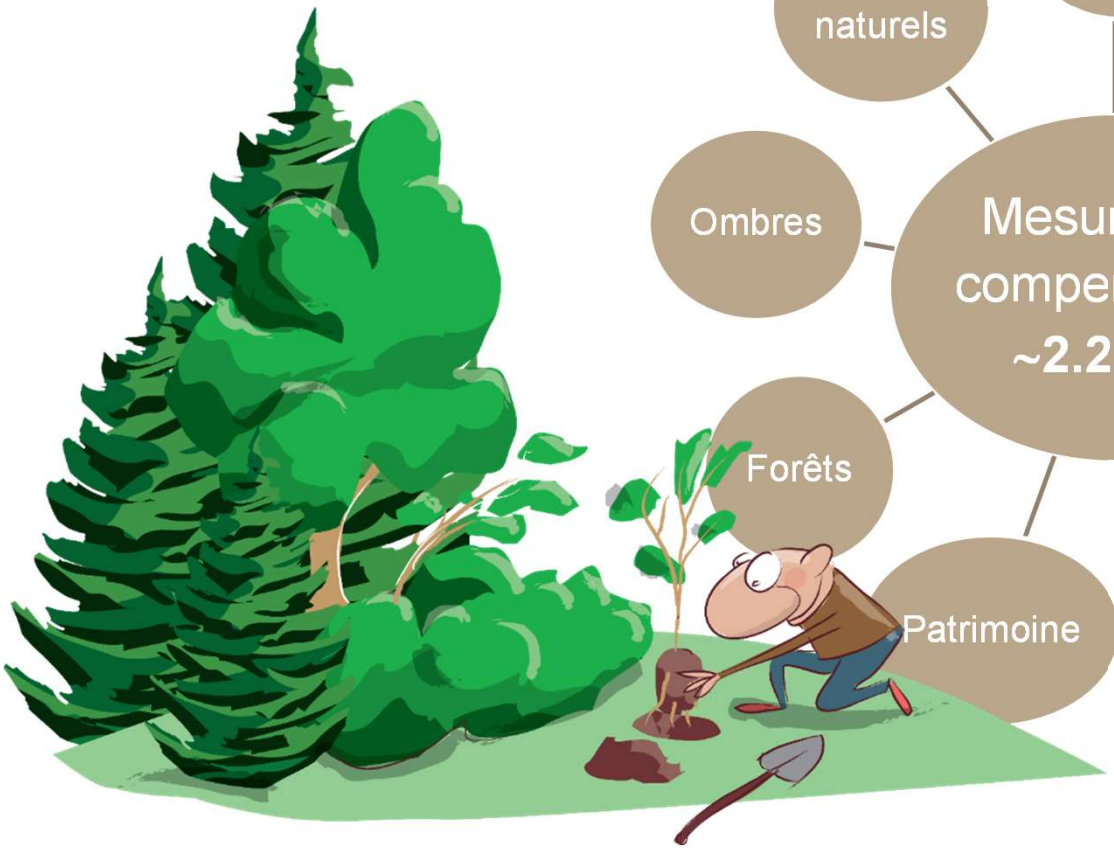
www.vogelwarte.ch

Parc éolien du Mollendruz: 12 éol. de 3 MW, max 210 m, 60 à 70 GWh/an

Mesure de compensation 2-3 couples d'alouette lulu: 125 ha et 430'000 frs

Eolien: impacts globaux, impacts locaux

Parc éolien de Grandsonnaz: mesures environnementales







4. Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

Méthodologie pour répondre à la question: «Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien ?»

1. Ne pas utiliser les prévisions de source «éolienne» (WindEurope, WWEA)
2. Sources crédibles: reconnues et régulièrement publiées
3. Sources diverses
4. Sources avec au moins un scénario: «Accord de Paris» (max. 2° C)

Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

Les sources pour les scénarios avec une contrainte à max +2 °C ?

- **Greenpeace**
  - fondé en 1971, siège à Amsterdam
  - 45 pays, env. 2400 employés, 47'000 bénévoles, 3 millions de membres
- **BNEF** = Bloomberg New Energy Finance
  - filiale de Bloomberg L.P, siège à New York: fondé en 1981, 167 pays, 20'000 employés, services financiers, info. économiques et financières (AP, télé, radio, internet, livres)
  - depuis 2009 «New Energy Outlook» ; 2019: 65 experts de BNEF
- **IRENA**
  - agence internationale pour les énergies renouvelables
  - fondé en 2009, 180 états
- **AIE**
  - fondé en 1974, agence de l'OCDE, 30 états (membres OCDE), siège à Paris
  - mission originelle: gestion des réserves stratégiques de pétrole
  - défiance des ERs et l'EE jusqu'au début 2010 → «Division énergie renouvelable»

Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

Monde 2050: scénarios avec contrainte à max +2 °C

Source	Electricité 2050 TWh	Eolien 2050 TWh - GW	PV 2050 TWh - GW
Greenpeace 2015 - 364 p. Energy [r]evolution	49'852	14'938 → **30%** 5'575	9'914 (20%) 6'745
BNEF 2019	53'268	13'850 → **26%** 4880 (estimation)	11'719 (22%) 7608
IRENA 2020 - 291 p. Transforming Energy Scenario	55'187	19'107 → **35%** 6'043	13'787 (25%) 8'519
AIE-WEO 2020 - 464 p. **en 2040** Sustainable development scenario	38'744	8'680 → **22%** 3'058	8'799 (23%) 5'891

Greenpeace: https://issuu.com/greenpeaceinternational/docs/energy-revolution-2015-full-hr
Bloomberg NEF: «New Energy Outlook», juin 2019, voir https://www.youtube.com/watch?v=ci_q-sUOJE8 et https://about.bnef.com/new-energy-outlook/ pour production électricité
IRENA: «Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050», 2020 (p. 69 idem que IRENA 2019 et p. 240)
AIE: «WEO 2020», octobre 2020 (pp. 345 et 369)

Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

EU-28 2050: scénarios avec contrainte à max +2 °C

Source	Electricité 2050 [TWh]	Eolien 2050 TWh - GW	PV 2050 TWh - GW
Greenpeace 2015 - 364 p. Energy [r]evolution	4404	1'592 → **36%** 570	723 (16%) 620
BNEF 2019	4000	2280 → **57%** ?	888 (22%) ?
IRENA 2020 - 291 p. Transforming Energy Scenario	4819	1927 → **40%** 621	1003 (21%) 784
AIE-WEO 2020 - 464 p. **en 2040** Sustainable development scenario	3970	1'559 → **39%** 476	596 (15%) 500
Suisse Stratégie 2050	~60	2035: 11.4 TWh → **19%** (LEne)	

Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

Synthèse: scénarios avec contrainte à max +2 °C

Sources: Greenpeace BNEF, IRENA, AIE	Electricité 2050 [TWh]	Eolien 2050 [TWh] [GW]	PV 2050 [TWh] [GW]
Monde[1]	50'000 à 55'000	14'000 à 19'000 → **26 à 35%** 4900 à 6000	9900 à 13'800 (20 à 25%) 6700[2] à 8500
Europe (UE-28)[1]	4000 à 4800	1600 à 2300 → **36 à 57%** 570 à 620[3]	720 à 1000 (16 à 22%) 620 à 780

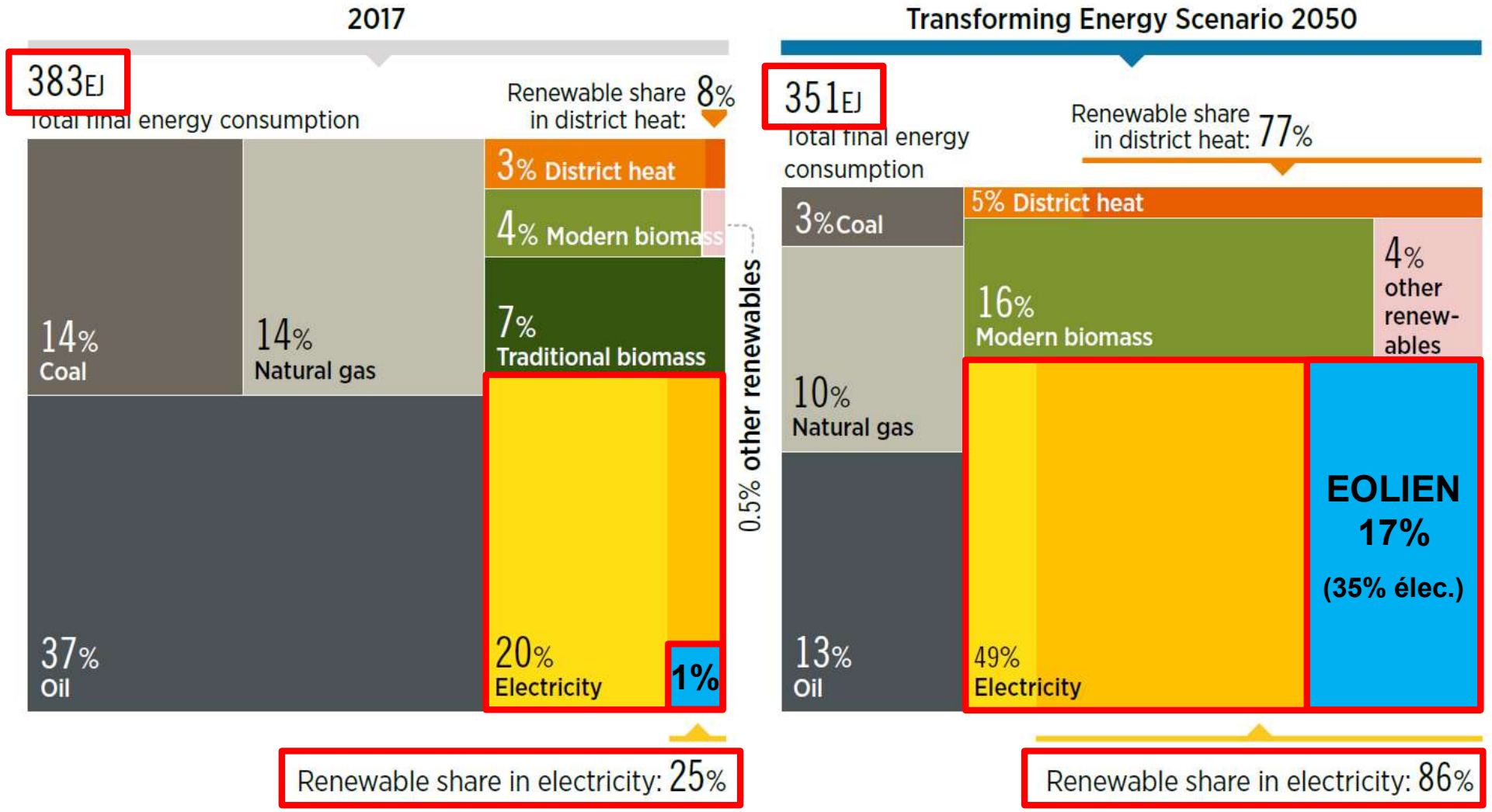
[1] Sans AIE, car 2040 uniquement
[2] Greenpeace 2015
[3] Donnée BNEF 2019 manque

Constat principal

Ces 4 études de sources fort diverses convergent:
l'éolien deviendra une des sources principales d'énergie pour «décarboner» notre planète afin de respecter l'Accord de Paris.

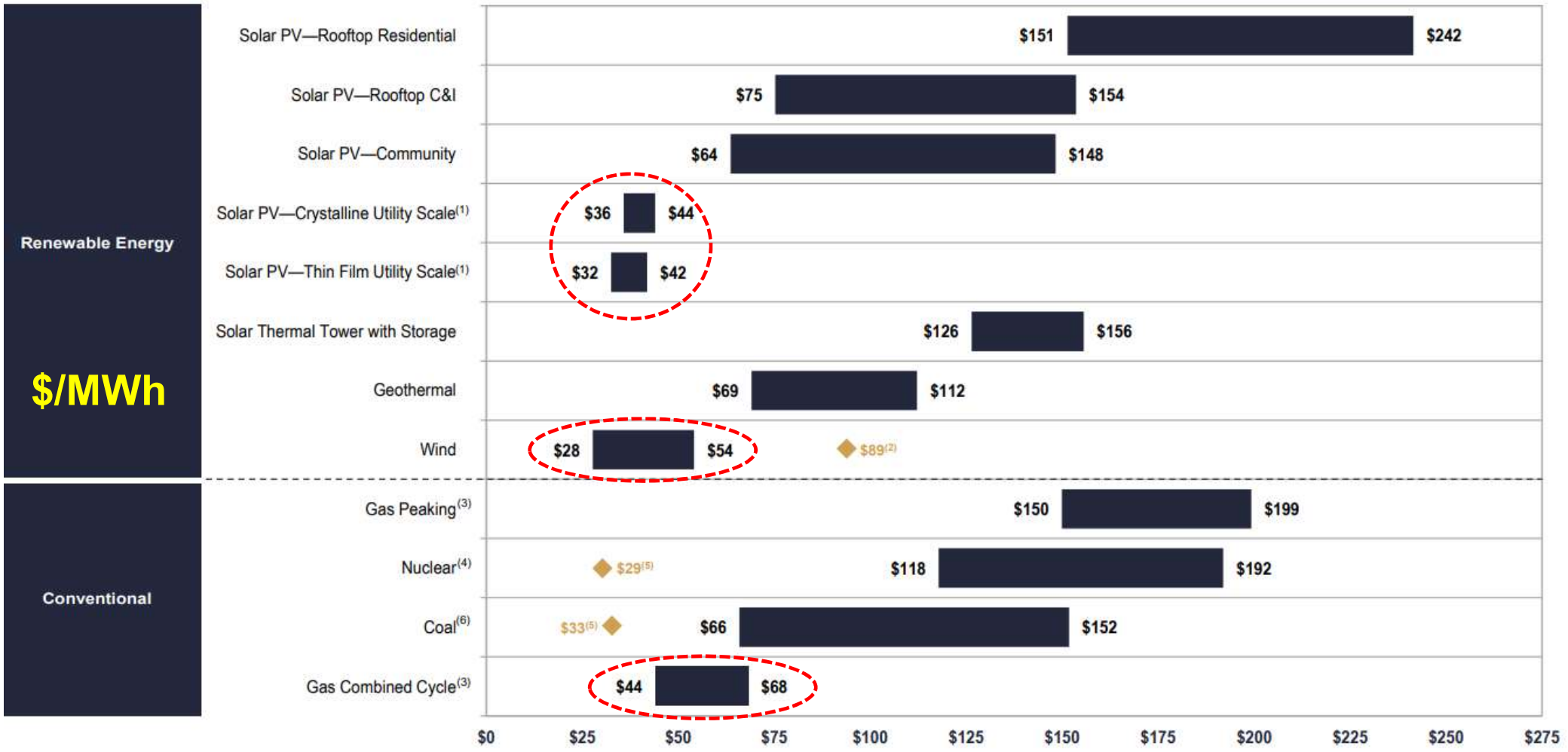
Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

Que sera le système énergétique mondial en 2050 ? (IRENA, 2020)



Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

LCOE Levelized Cost of Energy, coût actualisé de l'énergie (USA)



Banque Lazard (nov. 2019) : Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 13.0

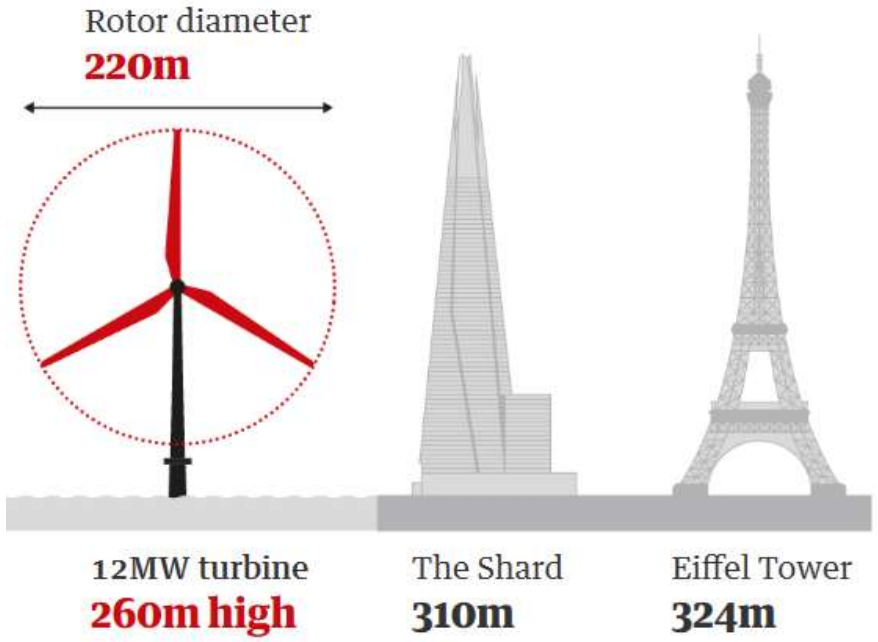
Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

Offshore: Dogger Bank 3 x 1'235 MW → 5% de l'électricité de GB



- 1ère étape de 1235 MW en service en 2023
  production: près de 6 TWh

- 1'235 MW = 95 x 13 MW, 220 m diamètre
  https://www.youtube.com/watch?v=RT1oaovO6NE



Urgence climatique: quelle contribution de l'éolien?

Onshore: évolution des éoliennes terrestres

Site	1 éolienne P en MW	Diamètre m	Hauteur m	Production GWh/an
Mont-Crosin / Mont Soleil (BE) Premières 1996 : 3 x 0.6 MW	0.6	44 (1520 m²)	70	0.6 (1997)
	5.5x		2x	8x
Dernières 2016 : 4 x 3.3 MW	3.3	112 (9850 m²)	150	5
	9x		3x	13x
Lindenberg (AG) - 2024 ? 4 x 5.3 MW	5.3	158 (19'600 m²)	230	> 8

5. Et en Suisse ?

Et en Suisse ?

Conception énergie éolienne fédérale (sept. 2020, p. 27)

Objectif du Conseil fédéral: 4'300 GWh en 2050
Romandie: 2'070 GWh en 2050 (estimation moyenne)

Cadre d'orientation[14] pour la **contribution des cantons** en ce qui concerne la production d'énergie éolienne d'ici **2050** selon la politique énergétique du Conseil fédéral	**Liste des cantons** (ordre alphabétique à l'intérieur de chaque classe)
0 – 60 GWh/a	Appenzell Rhodes-Intérieures, Bâle-Ville, Glaris, Nidwald, Obwald, Schaffhouse, Tessin, Uri, Zoug
40 – 180 GWh/a	Appenzell Rhodes-Extérieures, Argovie, Bâle-Campagne, Genève, Jura, Schwyz, Soleure, Thurgovie, Zurich
130 – 400 GWh/a	Lucerne, Neuchâtel, Saint-Gall, Valais
260 – 640 GWh/a	Fribourg, Grisons
570 – 1'170 GWh/a	Berne, Vaud

Et en Suisse ?

Les objectifs de production éolienne des cantons romands

Canton	VD	VS	NE	FR	JU	GE	TOTAL
Actuel GWh/an	0	23 (7 éoliennes)	0	0	20 (5)	0	**43** **(12)**
Objectifs GWh/an **Echéance**	600 2030	310 2035	200 2035	160 2035	150 2035	40 2030	**1460** **2030-2035**
% éolien **(de consommation 2018 GWh/an)**	13% 4565	9.7% 3197	18% 1109	9.0% 1784	28% 537	1.4% 2814	**10.4%** **14'006**

VD: Conception cantonale de l'énergie (juin 2019) et Plan climat «1ère génération» (juin 2020)
VS: Stratégie sectorielle «Energie éolienne» (sept 2014) et «Valais, Terre d'énergies: ensemble vers un approvisionnement 100% renouvelable et indigène» (avril 2019)
NE: Concept éolien du canton (août 2010)
FR: Plan sectoriel de l'énergie (juillet 2017)
JU: Conception cantonale de l'énergie et plan de mesures (mai 2015)
GE: Plan directeur de l'énergie (oct. 2020)

Et en Suisse ?

Sept projets éoliens au Tribunal fédéral

Projet	Porteur	Nb éol.	MW	GWh	Classés selon dépôt du recours au TF	Nb recours	Par HN = Helvetia Nostra FP = Fondation suisse pour la protection du paysage PLV = Paysage libre Vaud	Objet du recours PPA = plan partiel d'affectation PAC = plan affectation cantonal PAD = plan aménagement détaillé
Grenchen (SO)	SWG	6	16	32	10.2018	1	BirdLife	PPA validé par canton (RRB 2017/1238)
St-Croix (VD)	Romande Energie	6	14	22	01.2019	2	Ass. sauvegarde des Gittaz et du Mont-des-Cerfs BirdLife et HN	PAC et PC validés resp. canton et commune
Sur Grati (VD)	VOénergies	6	18	49	11.2019	1	HN et habitants de la région	PPA validé par le canton
EolJorat Sud (VD)	SIREN	8	28	63	11.2019	2	Commune de Cugy 11 personnes membre de Eole Responsable	PPA validé par le canton
Mollendruz (VD)	ewz communes	12	36	65	07.2020	1	ProNatura, BirdLife, HN, FP, PLV, SOS Jura	PPA validé par le canton
Charrat (VS)	ValEole	3	10.5	20	10.2020	1	Association de riverains	PAD validé par le canton
M. de Buttes (NE)	SIG Groupe e	19	57	100	01.2021	1	HN et particuliers	PAC validé par le canton
		60	180	351				

Et en Suisse ?

EIE – tribunaux et impact climatique

		Union-Européenne	France	Autriche	Allemagne	Irlande	Suisse
Prise en compte de l'impact positif sur le climat	dans le cadre légal	✓	✓	✓	✓	~	✗
	dans les EIE		✓	✓	✓	✓	~
	dans les jugements		✓	✓	✓	~	✗

EIE = étude d'impact sur l'environnement

«Considération de l'impact climatique des énergies renouvelables dans la pesée d'intérêts», OFEN, 3.2019, p. 38

Et en Suisse ?

Montagne de Buttes (NE) 19 x 3 MW (min) → 100 GWh/an

Montagne de Buttes sera un des plus grands parcs de Suisse
10% de la consommation électrique de l'ensemble du canton de Neuchâtel





Et en Suisse ?

San-Gottardo (TI) 5 x 2.35 MW → 16 à 20 GWh/an



6. Perspectives et synthèse

Perspectives

- **Eolien en Suisse: électricité renouvelable locale à bas coûts et faible impact sur l'environnement, à déployer sur des sites sélectionnés, complémentaire au PV et à l'hydroélectrique, complètement réversible et dont la fabrication est issue d'usines européennes.**
- **Augmenter la durée de vie des éoliennes: 20 ans → 25 ans → 30 ans et plus**
- **Réduire à 0 g éq. CO_2 la production d'une éolienne européenne**
- **Sélectionner avec soin les sites d'implantation**
- **Optimiser «totalement» le recyclage (actuellement env. 90% de la masse)**
- **Produire une éolienne standard terrestre?**
  - **Entre 4 à 5 MW**
  - **Durée de vie de l'ensemble, hormis les pâles > 50 ans**
  - **Normalisation: qui sera le pilote?**

Synthèse (1)

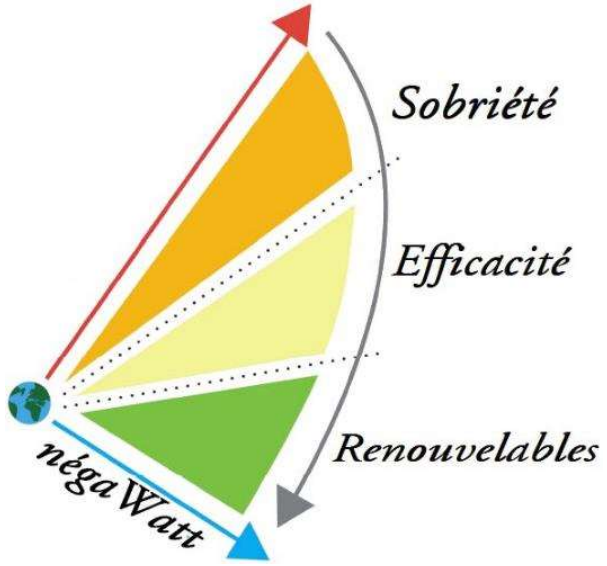
- En 2050, afin de respecter l'Accord de Paris, l'éolien devrait être la 1ère source de production d'électricité, selon AIE, IRENA, BNEF, Greenpeace:
  - Monde: 26 à 35% de 50'000 à 55'000 TWh/an (PV: 20 à 25%)
  - Europe: 36 à 57% de 4000 à 4800 TWh/an (PV: 16 à 22%)
- Eolien en Romandie en 2030-2035: 1.5 TWh/an = 10% consommation
- Eolien en Suisse

Environnement global Hors EIE - non évalué par tribunaux		Environnement local Dans les EIE - évalué par les tribunaux		
Changements climatiques 15 g CO_2 éq/kWh	Impact global sur l'environnement 71 UCE/kWh	Oiseaux à évaluer selon le parc éolien	Chauve-souris avec algorithme d'arrêt éoliennes	Impact sur le paysage: réversible

Synthèse (2)

- **Poursuivre l'optimisation de l'éolien: durée de vie, coûts, recyclage et décarbonation**

- **Les renouvelables sont un des trois piliers de la transition énergétique**



- **«La sortie des énergies fossiles et du nucléaire d'ici à 2050 est techniquement faisable, économiquement intéressante et socialement supportable.» Prof. Hans-Rudolf Schalcher - ETHZ, Le Temps 15.01.20 (clôture PNR 70 et PNR 71)**

Merci pour votre attention



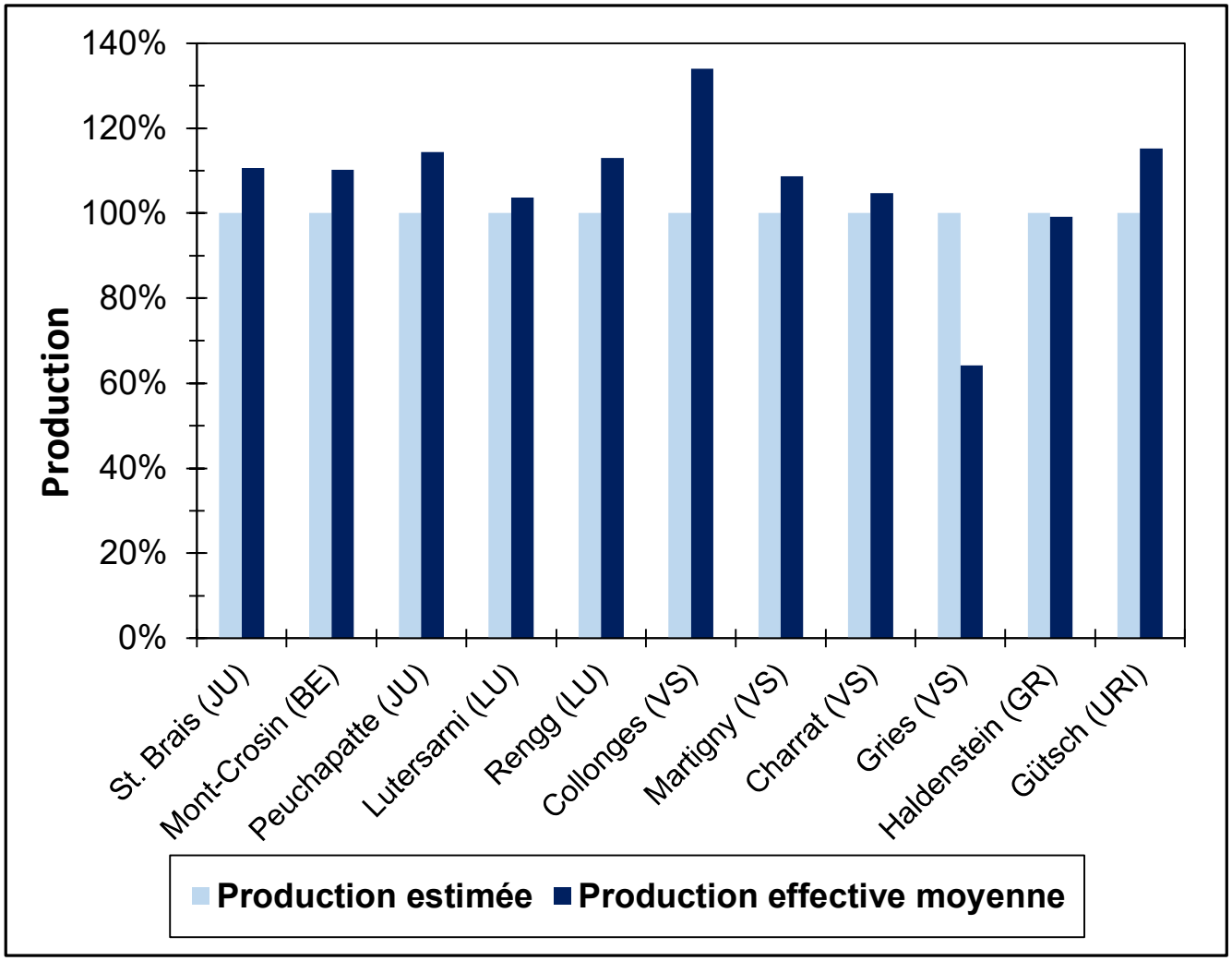
Mont-Crosin (BE)

Sites éoliens suisses: production estimée et effective (réelle)

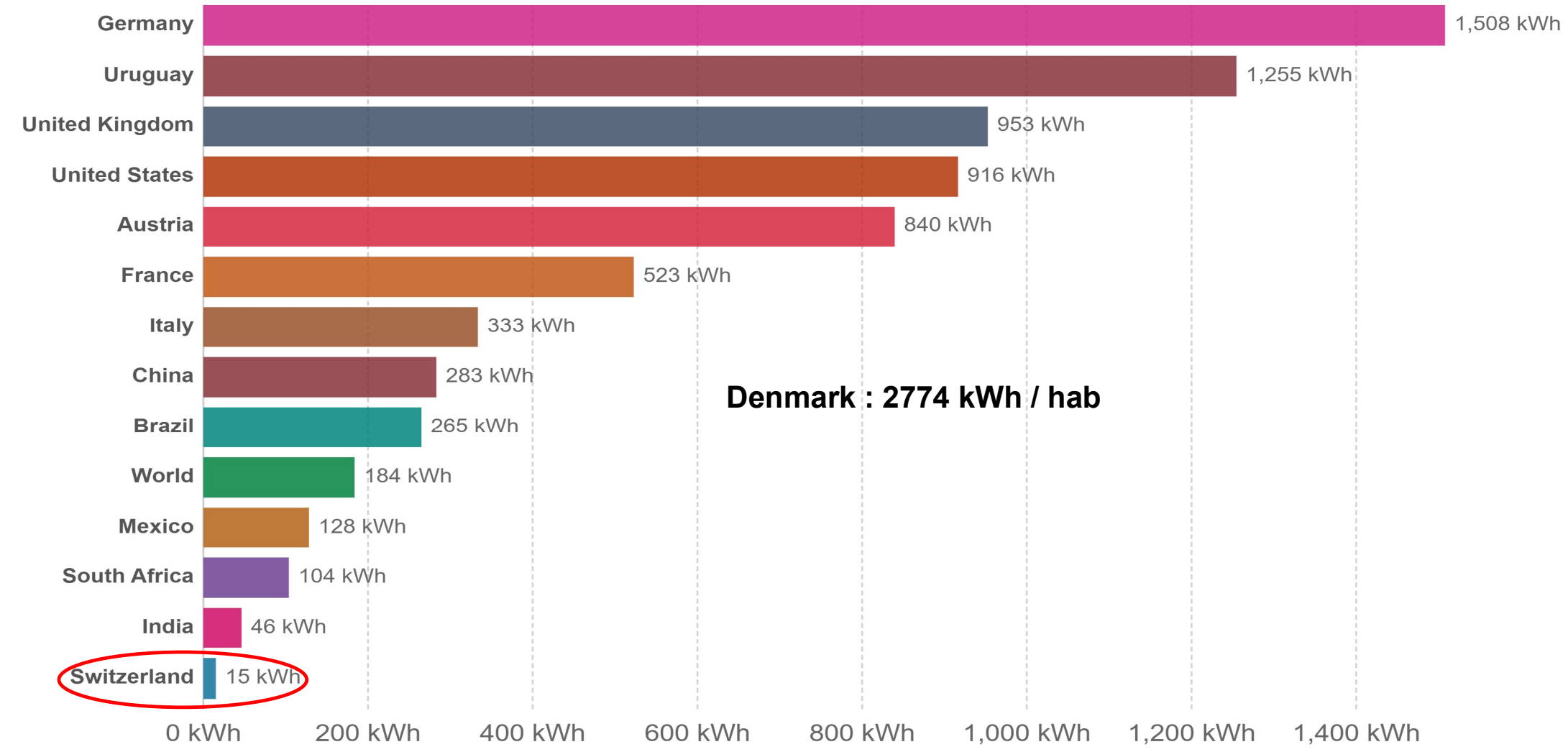
Pour 9 sites éoliens sur 11, la production effective moyenne est supérieure à la production estimée avant la construction.

Pour un site elle est similaire (Haldenstein).

Pour un site elle est inférieure (parc de Gries cité dans le Temps Présent du 3.12.2020).



Eolien (2019): kWh par habitant (Our World in Data)



Carte des vents: moyenne annuelle modélisée à 125 m du sol

