

## 4. Impacts de la fracturation hydraulique sur l'environnement et la santé humaine

Bien que le gaz de schiste soit le même que le gaz compris des roches réservoirs (du méthane), c'est la technique utilisée pour son exploration et son exploitation qui pose problème. La fracturation hydraulique, seule technique actuellement utilisable, présente des risques très importants pour la santé et l'environnement. Un rapport commandé par le congrès des États-Unis auprès du Bureau de responsabilité gouvernementale<sup>(118)</sup>, une agence indépendante, révèle que la mesure des risques n'a pas encore été entièrement quantifiée, et que beaucoup de questions restent en suspens, en raison notamment du manque de données scientifiques. On sait que le principal risque de dommage pour l'environnement intervient dès la première fracturation, pendant la phase d'exploration.

### 4.1. Impacts sur une ressource vitale : l'eau

#### 4.1.1 Aspect quantitatif

L'Office américain de l'énergie révèle qu'aux États-Unis, chaque puits forés dans la formation de schiste de Barnett, dans le bassin de Fort Worth (Texas), nécessite quelques 11 000 m<sup>3</sup> d'eau douce lors de la fracturation hydraulique.

Sachant qu'un seul puits de gaz de schiste peut consommer en moyenne 15 000 m<sup>3</sup>, et beaucoup plus si le puits est constitué d'un forage multi drains, c'est au minimum 5 hectares de champs de blé qui ne seront pas irrigués. Selon les estimations de la FAO, cette même quantité d'eau correspond aux besoins de 100 nomades et 450 têtes de bétail pendant 3 ans, ou 100 familles rurales raccordées au réseau de distribution pendant 4 ans, ou 100 familles urbaines dans un quartier populaire pendant 2 ans

Cette eau est puisée dans les eaux de surface, les eaux souterraines ou le réseau d'approvisionnement des collectivités. Les eaux profondes sont rarement utilisées à cause de leur salinité. L'utilisation de telles quantités d'eau pourrait donc entraîner un conflit d'usage avec les autres secteurs (agriculture, usage domestique...) dans les régions qui disposent de faibles réserves en eau. D'ailleurs, dans certains états des États-Unis, l'eau manque déjà pour permettre la fracturation hydraulique et les entreprises de forage sont entrées en conflit avec les agriculteurs. Le prélèvement d'un important volume d'eau douce dans le milieu naturel, même sur une courte période, a des effets sur les écosystèmes aquatiques et humides, les puits d'eau potable, les systèmes d'irrigation agricole...

#### 4.1.2. Risque d'infiltration du gaz et du liquide de fracking dans les nappes phréatiques

Bien que les industriels le nient, il existe bel et bien un risque que l'eau de fracturation se mélange à l'eau des nappes aquifères. Les secousses générées dans le sous-sol peuvent engendrer ou activer des failles ou des fissures telles que le fluide de fracturation migre vers des nappes d'eau souterraines ou remonter à la surface. Il faut noter que le phénomène de propagation des fissures est mal connu des géologues ; sans compter qu'ils avouent eux-mêmes que ce phénomène est difficile à prédire dans le temps. Par ailleurs, les risques de contamination des eaux varient considérablement d'un milieu à un autre et il est fortement recommandé de

prendre connaissance des caractéristiques des formations géologiques (profondeur, nature, composition, préexistence de fissures naturelles...) afin d'évaluer le risque avant de procéder aux fracturations. Une étude préliminaire de l'EPA a montré que la fracturation hydraulique peut contaminer directement les sources d'eau potable : 6% des puits sont défectueux en matière de protection des nappes aquifères. Mais le plus grand risque vient paradoxalement des activités précédant et suivant la phase de fracturation hydraulique *stricto sensu*. Différentes voies de contamination des aquifères sont ainsi identifiées (Tableau 13) :

	<i>Etape</i>	<i>Risque</i>	<i>Voie de contamination des aquifères</i>
<i>Avant</i>	<b>Transport des produits chimiques par camion</b>	Accident de la route	Déversement
	<b>Stockage des produits chimiques sur site</b>	Fuite des fûts	Infiltration
<i>Pendant</i>	<b>Fracturation</b>	Accident de forage, incendie, explosion de puits, reflux des fluides de fracking (flowback)	Infiltration
		Mauvaise estimation de la géologie du sous-sol	Fissuration des couches géologiques et migration de slickwater vers les aquifères profonds ou de surface
		Défauts de cimentation et de coffrage du puits	Fuite de gaz et de slickwater
<i>Après</i>	<b>Gestion des eaux usées et des boues de forage</b>	Fuite des bassins de rétention (membranes géotextiles défectueuses, débordement...)	Infiltration
	Stockage		
	Transport	Accident durant le transport des eaux usées	Déversement
	Elimination	Rejet volontaire dans la nature	Contamination du milieu
		Injection du flowback dans des puits de récupération	Fissuration des couches géologiques migration des fluides de fracking vers les aquifères profonds ou de surface
	Traitement	Stations d'épuration inefficaces	Rejet d'eaux polluées dans le milieu naturel (mer, rivières...)
	<b>Abandon de puits</b>	Corrosion des tubages et détérioration de cimentation	Mélange du méthane à l'eau

Tableau 13 : Identification des voies de contamination des aquifères lors des différentes étapes de l'exploration d'un puits de gaz de schiste, avant, pendant et après la fracturation. *Slickwater* = fluides de fracking

#### 4.1.2.1 Du gaz dans l'eau ... du robinet

Le film documentaire « Gasland » réalisé par Josh Fox et qui a largement contribué à sensibiliser le grand public aux risques liés à cette industrie, révèle comment l'eau courante dans les maisons d'habitants vivant à proximité d'une zone de forage, peut, en raison de sa forte concentration en méthane, s'enflammer brutalement au contact d'une flamme (Figure 25).



Figure 25 : Explosion due à la présence de méthane dans l'eau de robinet<sup>(119)</sup>

En 2011, une étude réalisée par l'université de Pennsylvanie démontre que du méthane a été détecté dans 24% des sources d'eau analysées dans la région de Marcellus en Pennsylvanie<sup>(120)</sup>. La même année, une autre étude menée par l'équipe de l'université Duke (Caroline du Nord, États-Unis) s'intéressait aux 60 puits d'eau potable des États de Pennsylvanie et de New York. Les résultats de cette étude ont montré que l'eau des 34 puits situés à une distance supérieure à 1 km d'un forage d'exploitation de gaz de schiste contenait en moyenne 1,1 mg de méthane par litre d'eau. Tandis que l'eau des puits situés à moins d'un kilomètre, en contenait en moyenne 19,2 mg/l et jusqu'à 64 mg/l pour le puits le plus proche. La signature isotopique du carbone et de l'hydrogène (<sup>13</sup>C et deutérium) confirme l'origine indéniable du gaz comme provenant de l'exploitation de gaz de schiste et non pas de la décomposition organique du sol, comme le soutiennent certains industriels<sup>(121)</sup>. En 2013, la même équipe de chercheurs a analysé l'eau de 141 puits privés. Du méthane, de l'éthane et du propane ont été détectés dans 82% des cas. Les valeurs de méthane de l'eau de robinet des maisons situées à moins d'1 Km du site d'exploitation étaient 6 fois plus élevées que celles des maisons plus éloignées, avec des taux avoisinant 28 mg/l (soit le seuil d'«action immédiate», selon la réglementation en vigueur). L'eau la plus contaminée contenait près de 70 mg/l de méthane<sup>(122)</sup>. La contamination de l'eau par le gaz est due à des défauts d'étanchéité des tubages ou de la cimentation de l'espace annulaire entre la roche et les tubages (figure 26). En 2010, l'Etat de Pennsylvanie a relevé 90 cas de violations de la loi pour coffrage et cimentation défectueux sur 64 puits de gaz de schiste et 119 cas de violations similaires en 2011<sup>(123)</sup>.

Outre les défauts d'étanchéité des tubages ou des coffrages, ce sont les fractures elles mêmes provoquées dans les roches de sous-sol, qui peuvent transporter les fluides de fracturation au travers des formations géologiques jusqu'aux nappes phréatiques. L'impact de la migration des gaz et des fluides à partir de puits de pétrole et de gaz abandonnés est une problématique qui n'a pas encore été correctement étudiée. L'obtention de données géophysiques et géochimiques précises permettra le développement de méthodes prédictives fiables quant au devenir des fluides dans le sous-sol.

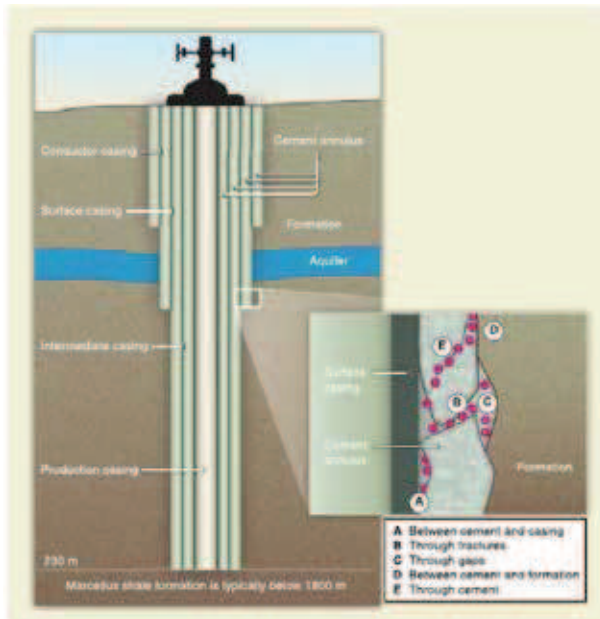


Figure 26 : Construction d'un puits typique du gisement de Marcellus (Pennsylvanie) avec ses différents coffrages (casing) cimentés. L'insert (A à E) montre les différents défauts potentiels qui pourraient expliquer la migration du gaz à travers le coffrage.

#### 4.1.2.2 Des substances toxiques dans les puits, les sources d'eau et les rivières

En mars 2009, l'EPA entamait pour la première fois une enquête sur la qualité de l'eau, dans le village de Pavilion, Wyoming, où l'extraction du gaz de schiste était en cours depuis 5 ans. Les conclusions de l'enquête ont confirmé que l'eau de 11 des 17 puits des résidents contenait entre autres du 2-butoxyéthanol (hautement cancérigène), de l'arsenic, du cuivre et d'autres métaux. Depuis le 31 août 2010, les résidents de Pavilion, à proximité de la formation de Barnett Shale, ont interdiction de boire l'eau de leurs puits ou d'utiliser leur ventilation (risques d'explosion !). Ce constat n'est pas un cas isolé, ni dans le temps ni dans l'espace. Au Texas, des niveaux élevés d'arsenic, de sélénium et de baryum ont été trouvés dans 99 des 100 puits d'eau privés analysés. Fin 2014, l'incendie d'un puits de forages en Ohio a fait exploser les camions du site contenant près de 100 000 litres de produits chimiques destinés au fracking. Les analyses chimiques du cours d'eau avoisinant ont montré la présence de plusieurs composés hautement toxiques dont du benzène, du toluène, du xylène et des phtalates<sup>(124)</sup>. Dans 20% des puits, les taux d'arsenic étaient largement supérieurs à la limite autorisée (10µg/L)<sup>(125)</sup>. Début 2015, les déversements de milliers de litres d'hydrocarbures et de fluide de fracturation ont été constatés dans le Montana<sup>(126)</sup> et dans le Dakota du nord<sup>(127)</sup>.

#### 4.1.2.3 Salinisation des nappes phréatiques

Les acides contenus dans le liquide de fracturation dissolvent les minéraux des roches. Lors cette réaction, des sels se forment et se rajoutent aux sels présents à l'état naturel. Les eaux récupérées post-fracturation ont des salinités très élevées, jusqu'à 5 fois la salinité de l'eau de mer, qui peuvent nuire aux sols, aux réserves d'eau douce environnantes et au système de traitement de ces eaux usées<sup>(128)</sup>.

#### 4.1.2.4 Des éléments radioactifs et des métaux lourds dans les liquides résiduels de fracturation

Les nappes phréatiques et le sous-sol sont mal connus à de grandes profondeurs (>3 km). Les roches mères sont particulièrement riches en métaux lourds (arsenic, plomb, mercure...) et parfois même en éléments radioactifs (radium, thorium, uranium). Ces composés, naturellement contenus dans les schistes, peuvent ainsi être libérés à partir de la roche mère lors des fracturations successives (notamment à cause de la dissolution des roches par les acides injectés) et se retrouver dans les liquides résiduels de l'exploitation du gaz de schiste.

Dans le bassin de Ghadames (voir chapitre 2, Tableau 9), la formation Tannezuft du réservoir Silurien est décrite comme « *hot shale* » : des schistes contenant des éléments radioactifs, notamment de l'uranium.

Le *New York Times* a mené une enquête à partir de 30 000 pages de documents confidentiels provenant de l'EPA, et de différentes sources internes à l'industrie, qu'il s'est procuré<sup>(129)</sup>. Il a pu ainsi recenser la radioactivité présente dans 149 des quelques 200 puits forés dans l'État de Pennsylvanie et recense 42 puits dont l'eau rejetée dépasse la norme autorisée pour l'eau potable en radium (Figure 27), 4 dans le cas de l'uranium, 128 les dépassent pour le « *gross alpha* » (des radiations causées par les émissions d'uranium et de radium).

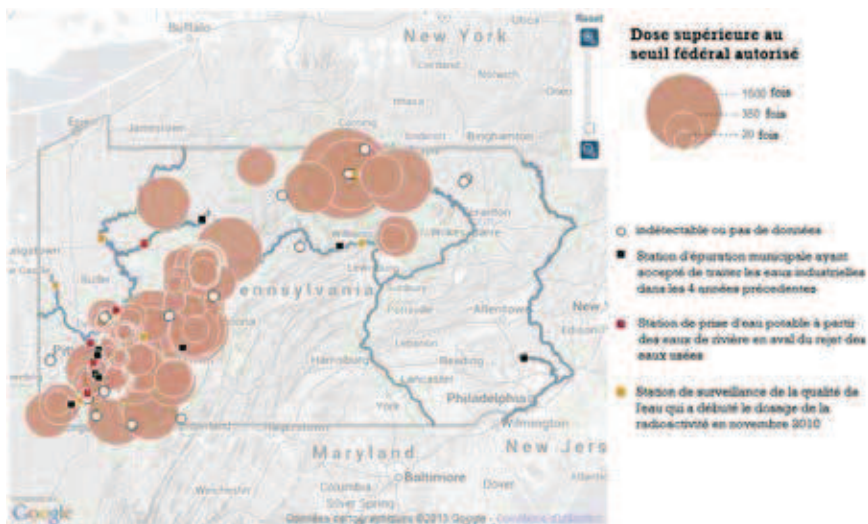


Figure 27 : Cartographie des particules radioactives dans les eaux résiduelles de fracturation des puits de gaz de schiste dans l'État de Pennsylvanie (États-Unis).

#### 4.1.3. Sol, rendement agricole et fracturation hydraulique

Les volumes d'eau utilisés pour la fracturation hydraulique sont soustraits à d'autres usages et notamment à l'irrigation, affectant ainsi le rendement agricole. Sachant qu'un seul puits de gaz de schiste peut consommer en moyenne 20 000 m<sup>3</sup>, voir beaucoup plus si le puits est constitué d'un forage multi drains, c'est au minimum 5 hectares de champs de blé qui ne seront pas irrigués.

L'acidité du sol augmente à proximité des sites d'exploitation de pétrole et de gaz de schiste à cause des pluies acides générées entre autres par le torchage (brûlage). Cette acidification réduit la quantité de sels minéraux, entravant la croissance des plantes. De plus les sols, notamment en cas de déversements ou de fuites accidentels, reçoivent des métaux lourds, des éléments radioactifs et d'autres composés toxiques. Ces éléments, lorsqu'ils sont absorbés par les végétaux peuvent s'y accumuler et être transférés aux consommateurs, humains et animaux<sup>(130)</sup>. Il existe des témoignages d'agriculteurs qui ont vu leurs sols stérilisés après un déversement d'eau issue de la fracturation.

L'ozone, présent aux abords des sites d'exploitation, rabougrit les plantes, amoindrit la qualité des récoltes et abaisse leur rendement jusqu'à 30%<sup>(131)</sup>. En Ohio, il a réduit le rendement des cultures de soja. D'autres cultures y sont sensibles comme les épinards, les tomates, les haricots, la luzerne et d'autres fourrages. L'ozone endommage les plantes en inhibant la photosynthèse et le développement des racines<sup>(132)</sup>. Ce gaz est nocif pour le bétail qui peut en concentrer dans sa chair et dans le lait. De manière générale, les animaux d'élevage des fermes aux abords des sites d'exploitation subissent les effets toxiques des produits chimiques utilisés pour la fracturation qui se retrouvent dans l'air, dans l'eau, dans le sol et dans leur nourriture. La vétérinaire, Michelle Bamberger et Robert E. Oswald, de l'Université de Cornell, ont produit une enquête scientifique sur la "mort du bétail liée aux liquides de fracturation hydraulique". Leur étude porte sur 24 fermes à proximité de forages gaziers dans six états des États-Unis<sup>(133)</sup>. Les chercheurs ont constaté des problèmes gastro-intestinaux neurologiques et de reproduction, des accouplements infructueux et des animaux mort-nés présentant souvent des déformations congénitales. En Pennsylvanie, sur les 140 bovins exposés aux eaux usées provenant de la fracturation, environ 70 vaches sont mortes ; le reste a produit onze veaux, dont trois seulement ont survécu. Dans ce même État, dans les comtés comprenant plus de 150 puits de gaz de schiste, le nombre de vaches laitières a accusé un déclin de 16% contre 3% dans les comtés sans puits. En Louisiane, 17 vaches sont mortes après avoir été exposées à des fuites d'eaux usées de fracturation mélangées aux sources d'eau douce (figure 28).



Figure 28 : Sur le site de Chesapeake Energy Corp. (Louisiane), empoisonnement mortel de 19 bovins, par du liquide de fracturation en 2011.



Il n'existe, à ce jour, aucune autre étude sur le sujet, d'une part, parce qu'il n'y a pas de financements de recherche pour cette thématique d'études et, d'autre part, parce que les fermiers ne veulent ou ne peuvent pas communiquer pour des questions d'image de marque de leur produits agricoles, parce qu'ils craignent des représailles de membres de la communauté, parce qu'il ne veulent pas risquer d'être poursuivis par une compagnie pétrolière pour diffamation ou parce qu'ils ont signé des accords de non-divulgaration contre dédommagements pécuniers<sup>(134)</sup>.

#### 4.1.4. La situation en Tunisie: vers un épuisement des réserves en eau

La sécurité hydrique se définit comme l'accès durable en quantité suffisante à des eaux de qualité acceptable. Selon la FAO, le stress hydrique correspond à un approvisionnement en eau inférieur à 1 700 m<sup>3</sup> par habitant et par an. La Tunisie dispose de moins de 430 m<sup>3</sup>/an/habitant (comparé aux Etats-Unis, ce même chiffre varie entre 6 000 et 15 000). Le pays se trouve en dessous du seuil de pénurie structurelle et est classé 9<sup>ème</sup> sur la liste des pays menacés de pénurie d'eau<sup>(135)</sup> (Figure 29). Cette situation chronique et critique, représente une contrainte grave au développement socio-économique et à la sauvegarde de l'environnement.

L'eau représente un enjeu vital qui jusque là, en Tunisie, était géré au mieux, compte tenu de la situation climatique et de la médiocrité du potentiel hydrique, par la mise en place de barrages et de lacs collinaires, mobilisant au total 2 343 Mm<sup>3</sup>/an<sup>(136)</sup>. Mais les efforts consentis restent très insuffisants. Le secteur agricole est fortement pénalisé par cette pénurie puisque sur les 5 millions d'hectares de terres cultivables, seulement 1/10<sup>ème</sup> (500 000 ha) sont irrigables<sup>(137)</sup>. De plus, les eaux disponibles dépassent les standards internationaux sanitaires ou agronomiques de salinité. Seulement 50% des ressources présentent une salinité inférieure à 1,5 g/L alors que 16% ont une salinité supérieure à 3 g/L<sup>(138)</sup>. Le pays n'arrive pas à réaliser son autosuffisance alimentaire. La demande croît à un rythme plus soutenu que celui de la démographie. La Tunisie se voit contrainte d'importer des produits agricoles y compris des aliments de base (blé-60%, sucre...). Pour tenter de pallier à ce déficit hydrique, l'État a engagé une politique d'économie et de rationnement d'eau et a recours à de l'eau « non conventionnelle » avec le dessalement des eaux saumâtres ou la réutilisation des Eaux Usées Traitées (EUT) pour l'irrigation des champs, des espaces verts, la recharge artificielle des nappes.

En ce qui concerne les sols, environ 60 000 ha sont perdus annuellement à cause de la désertification, de l'érosion, de la salinisation et de l'expansion urbaine dont 20 000 ha/an de terres agricoles. Les surfaces agricoles sont passées de 0,88 ha par habitant, en 1967, à 0,46 en 2000<sup>(138)</sup>. La situation est critique au point qu'il est plus réaliste de viser la sécurité alimentaire plutôt que l'autosuffisance mais à condition d'intensifier l'irrigation des périmètres cultivables. Or les expériences passées montrent qu'en cas de conflits d'usage, le développement de nouvelles activités économiques se sont faites au détriment de l'agriculture. Cela a été le cas, pour le complexe touristique Nabeul-Hammamet ou la création de la zone industrielle de Gabès qui ont sévèrement laminé le secteur agricole en détournant ses besoins en ressources hydriques.

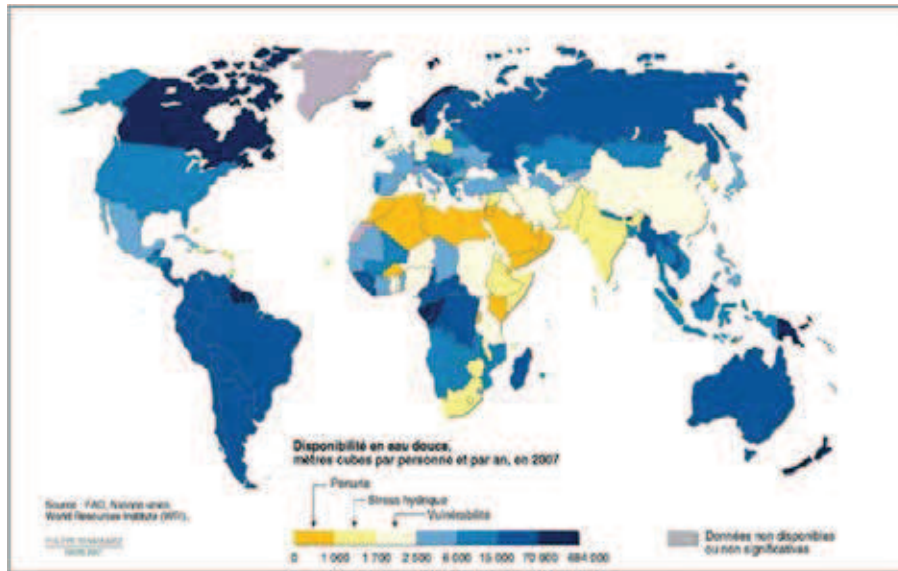


Figure 29 : Carte de la disponibilité des eaux douces à l'échelle mondiale ; source : FAO

Cette situation ne risque pas de s'améliorer. Dans son dernier rapport<sup>(140)</sup>, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) examine de nouveaux éléments concernant le changement climatique sur la base de nombreuses analyses scientifiques indépendantes d'observations du système climatique, d'archives paléo climatiques, d'études théoriques des processus climatiques et de simulations à l'aide de modèles climatiques. Ainsi que le montre la figure 30, les modèles prévisionnels d'évolution du climat à la surface de la Terre, d'ici à 2100, montrent que l'Afrique du Nord figure parmi les régions les plus touchées par le changement climatique avec des hausses de températures très importantes accompagnées d'une réduction des précipitations.

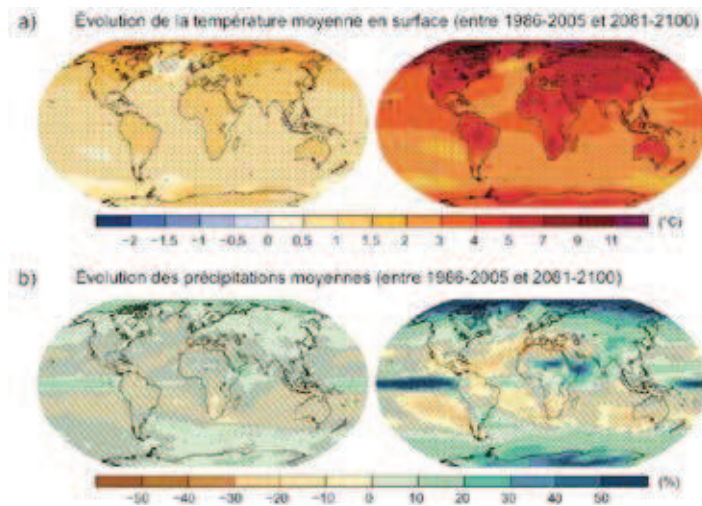


Figure 30 : Cartes des moyennes multi modèles CMIP5 sur la période 2081–2100 pour: a) l'évolution de la température moyenne annuelle en surface, b) l'évolution moyenne en pourcentage des précipitations moyennes annuelles.



### La situation dans les régions concernées par l'exploitation des énergies non conventionnelles : Kairouan, de Kébili et de Tataouine

Kairouan : Le gouvernorat de Kairouan couvre une superficie de 6 712 km<sup>2</sup> avec 590 000 ha de terres agricoles utiles dont environ 12% sont irrigués<sup>(141)</sup>. Son climat est semi-aride à aride. L'agriculture est le secteur économique le plus important du gouvernorat qui emploie 40% de la main-d'œuvre régionale et permet des revenus stables pour 70 % de la population. La région participe à hauteur de 11% environ de la production nationale agricole. Il compte trois grands barrages et alimente en eau des gouvernorats voisins (Sousse, Monastir, Mahdia). Environ 50% des eaux du gouvernorat de Sousse proviennent des bassins kairouannais. La construction de ces retenues d'eau empêche l'alimentation naturelle des nappes profondes du Kairouannais qui sont en surexploitation (Tableau 14). La situation est d'autant plus critique, que cette pression sur le prélèvement d'eau ne sera pas sans risque de salinisation des nappes et des sols. A terme, sous l'effet combiné de l'augmentation de la demande et du réchauffement climatique, c'est tout le potentiel hydrique de la région qui est menacé d'épuisement et qui laisse présager des conflits sectoriels et régionaux à venir<sup>(142)</sup>.

Kébili : La région est aride, à faciès désertique. Les activités économiques se concentrent principalement sur l'agriculture (oasis à palmiers dattiers) et le tourisme saharien. La région fournit plus de la moitié de la production nationale en dattes. Les périmètres irrigués s'élèvent à 23 859 ha (tableau 14) et le secteur agricole emploie 38% de la population active. Le suivi hydrologique atteste de la surexploitation, allant jusqu'à 166% dans le cas de la nappe profonde, qui épuise les différentes ressources en eau (eaux de surface, nappes phréatiques, nappes profondes) et augmente leur salinité (jusqu'à 18 g/L). Trois stations de dessalement sont actuellement en cours de construction.

Tataouine : Le climat est de type aride-saharien favorisant la désertification. Bien que Tataouine signifie « source d'eau » en berbère, le gouvernorat ne dispose que de peu de ressources propres en eau de surface du fait d'une faible pluviométrie. En revanche, il recèle des nappes phréatiques et profondes qui sont exploitées de façon disparate, certaines étant surexploitées et d'autres sous-exploitées<sup>(143)</sup> (tableau 14).

Tableau 14 : Volumes des ressources en eau et de leur exploitation (Mm<sup>3</sup>/an) et périmètres irrigués (ha) dans les gouvernorats de Kairouan, Kébili et Tataouine (CT= Complexe terminal ; CI = Complexe intercalaire)

		Kairouan <sup>144</sup>	Kébili <sup>145</sup>	Tataouine <sup>146</sup>
Nappes phréatiques	Ressources (Mm <sup>3</sup> /an)	63,5	5,49	15,14
	Exploitation (Mm <sup>3</sup> /an)	92,1	0,16	9,36
Nappes profondes (Pour Kébili et Tataouine : CT + CI)	Ressources (Mm <sup>3</sup> /an)	82	236,7	53,60
	Exploitation (Mm <sup>3</sup> /an)	80	393,1	19,94
Périmètres irrigués (ha)		68482	23859	7842

Les nappes profondes de Kébili et Tataouine appartiennent au système aquifère du Sahara septentrional (SASS). Ce dernier, partagé par l'Algérie, la Libye et la Tunisie, renferme des réserves d'eau considérables qui sont cependant peu renouvelables et de ce fait ne sont pas exploitables en totalité. Ces trois pays se partagent respectivement 70%, 22% et 8% des 1 019 000 km<sup>2</sup> de la superficie du SASS qui contient deux aquifères superposés, le continental intercalaire et le complexe terminal (figure 31).

Selon un rapport<sup>(147)</sup> de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), les premiers signes d'une détérioration de l'état de la ressource en eau ont déjà été enregistrés à cause de l'évolution du nombre de forages d'eau et de leur régime d'exploitation. Le secteur le plus exposé est celui des chotts au complexe terminal. C'est sans aucun doute la région où la nappe est la plus vulnérable. C'est là où se trouvent les plus fortes densités de population, et où la pression sur la ressource sera la plus forte. L'OSS a montré clairement que la simple poursuite des taux de prélèvements actuels entraînerait, à l'horizon 2050, des rabattements supplémentaires de l'ordre de 30 à 50 mètres sur chacune des deux nappes avec le risque de percolation du chott vers la nappe ; ce qui serait fatal pour cette dernière en terme de salinité. L'OSS estime qu'il serait tout à fait inacceptable pour la région des Chotts et qu'il faudrait sérieusement se préparer à la réduction des prélèvements.

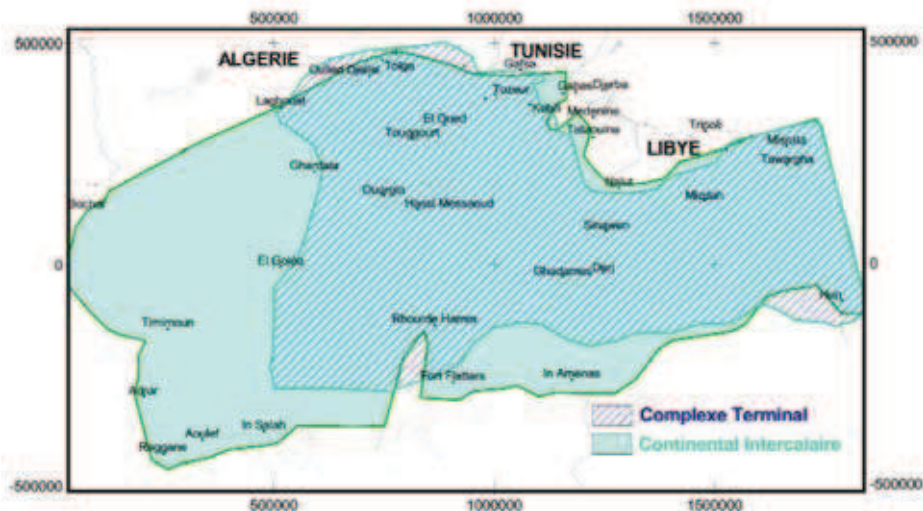


Figure 31 : Les formations du SASS

Outre le risque d'épuisement des nappes d'eau et ses conséquences, on ne saurait trop imaginer le désastre, à la fois écologique et socio-économique, qui résulterait de la pollution de cet immense système aquifère de par l'ampleur de la zone et le nombre de personnes touchées. Soulignons que le danger provient autant des projets d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures « extrêmes » en Tunisie qu'en Algérie.

## 4.2. Pollution atmosphérique et impact climatique

### 4.2.1 Fuites de gaz

Le problème des pertes de gaz sur les sites de production est un sujet communément admis (figure 32). En revanche, là où l'industrie gazière admet des pertes de méthane de l'ordre de 70 milliards de grammes/an, les études indépendantes montrent que ce chiffre doit être multiplié par 2 ou 3<sup>(148)</sup> (figure 33). En effet, des chercheurs de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) et de l'Université du Colorado ont mesuré les concentrations de différents polluants dans l'atmosphère, aux abords des puits des champs gaziers et pétroliers de différentes régions des États-Unis. Ils ont ensuite déduit, à partir de modèles atmosphériques et des données de rejets des industries, la quantité d'émissions de ces puits<sup>(149)</sup>. Les fuites de méthane représentent l'équivalent de 4% de la production de méthane pour le bassin Denver-Julesburg (Colorado), de 5% pour le bassin Uintah (Utah)<sup>(150)</sup>. Une autre étude donne les chiffres de 3,2% pour le bassin de Haynsville (Louisiane) et de 1,1% pour celui de Barnett (Texas). Globalement, le taux moyen d'émissions fugitives de l'industrie du gaz aux Etats-Unis est de 5,4% soit plus de deux fois celui indiqué par l'industrie<sup>(151)</sup>.



Figure 32 : Fuite de gaz dans un puits d'extraction à Marcellus Shale. (Source: powderriverbasin.org)

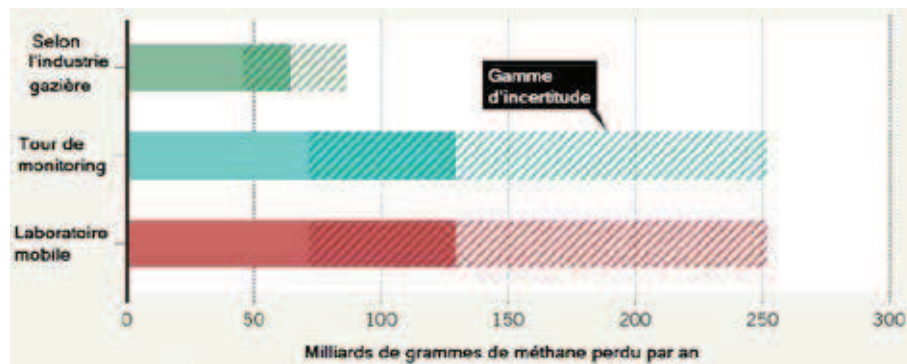


Figure 33 : Estimation des pertes annuelles de méthane des champs gaziers du Colorado selon l'industrie gazière, les tours de monitoring et les laboratoires mobiles. (Source : traduit d'après Tollefson J. *ibid*)

Les puits de gaz de schiste fuient plus que ceux de gaz compris dans des roches réservoir parce que le processus de fracturation hydraulique à haut volume amplifie ces pertes. Lorsque l'eau de fracturation remonte à la surface, après avoir fracturé la roche mère en profondeur, elle est accompagnée de grandes quantités de méthane dissous<sup>(152)</sup>. Cette étape dure de quelques jours à quelques semaines, l'ampleur des émissions varie dans le temps, avec comme conséquence le fait que le moment de prise de la mesure est déterminant pour une appréciation correcte des émissions. Les puits peuvent fuir à chaque étape du processus d'exploitation, même pendant la phase de forage<sup>(153)</sup>. De plus, la fuite des gaz ne se produit pas uniquement aux abords des puits mais aussi durant leur stockage, leur transport et le raffinage des hydrocarbures. Les calculs qui ne se focalisent que sur une seule source d'émission sous-estiment forcément les quantités de méthane libéré dans l'atmosphère.

Le problème des fuites est aggravé par l'étanchéité des puits qui diminue avec le temps. En effet, l'acier des tubages finit par se corroder et les coffrages de ciment, qui maintiennent le puits, se fissurent sous l'effet des fracturations répétées. Ces matériaux doivent pouvoir résister à une pression de 10 000 t/m<sup>2</sup> lors de la fracturation dans un milieu très salé et chaud. Les joints d'acier finissent par se désagréger. L'étude de Schlumberger, dans le Golfe du Mexique montre que sur 15 000 puits de pétrole conventionnel (il s'agit des mêmes aciers que ceux utilisés pour la fracturation hydraulique), la moitié fuit après 10 ans. Les puits abandonnés, parce que plus productifs ou plus rentables, continuent eux aussi à émettre du méthane. Il y en aurait près d'un million aux États-Unis<sup>(154)</sup>.

En plus du méthane, d'autres gaz, comme le propane, le butane ou autres composés organiques volatiles (COV) peuvent s'échapper. En 2012, Theo Colborn et ses collaborateurs<sup>(155)</sup> ont étudié la qualité de l'air dans des zones rurales du Colorado, à environ 1 Km d'un forage suivi de fracturation hydraulique. Ils ont effectué des mesures toutes les semaines pendant une année afin de déterminer, qualitativement et quantitativement, les composés chimiques présents dans l'air ambiant. Le tableau 15 regroupe l'ensemble des composés retrouvés dans l'air dont certains sont hautement cancérigènes. Les valeurs détectées se trouvent être en dessous des normes permises mais les chercheurs soulignent le fait que ces normes concernent des adultes qui sont exposés sur de courtes périodes et non pas les enfants, les femmes enceintes et les personnes âgées qui y sont exposés de façon chronique 24h par jour, 7 jours sur 7. Une étude, basée sur une surveillance de 3 ans a mesuré des taux élevés de COV nocifs (notamment de benzène, éthylbenzène, toluène et xylène) dans l'air des régions où est extrait le gaz de schiste<sup>(156)</sup>. Ce taux diffère d'un facteur de 7 par rapport aux estimations officielles. D'ailleurs, l'estimation de l'État pour le total des COV émis par les activités pétrolières et gazières est deux fois plus faible que ceux d'études indépendantes<sup>(157)</sup>.

Selon les estimations de la NOAA<sup>(157)</sup>, les niveaux de propane à Erie (Colorado) sont supérieurs à ceux de zones d'extraction intensive comme Houston (Texas) ou même Pasadena (Californie), pourtant réputée pour la piètre qualité de son air<sup>(158)</sup>.

L'une des conséquences directes de ces fuites est l'explosion accidentelle des puits, avec ses dégâts matériels et ses éventuelles pertes humaines, mais aussi l'impact sur le réchauffement climatique (figure 34).

Tableau 15 : Liste des composés chimiques retrouvés dans l'air dans les zones rurales du Colorado à 1 km des zones de forage. (Source : Colborn T. et al. *Ibid*)

Chemical name	CAS #	<i>n</i> Detects	% Detects	Mean ppbv	Range ppbv	Std Dev ppbv	<i>n</i> Spikes
<b>VOCs</b>							
					1600.0-		
methane	74-82-8	48	100	2472.9	5500.0	867.3	6
ethane	74-84-0	48	100	24.4	3.6-118.0	23.7	5
propane	74-98-6	48	100	9.3	1.1-46.7	9.0	7
toluene	108-88-3	48	100	1.2	0.4-4.3	0.9	4
isopentane	78-78-4	43	90	1.8	0.4-7.3	1.3	6
n-butane	106-97-8	42	88	3.2	0.8-14.0	2.6	4
isobutane	75-28-5	42	88	2.9	0.6-13.5	2.5	4
acetone	67-64-1	41	85	9.5	3.4-28.3	6.2	6
n-pentane	109-66-0	40	83	1.5	0.4-5.6	1.0	5
n-hexane	110-54-3	38	79	0.9	0.3-3.0	0.6	4
methylcyclohexane	108-87-2	36	75	0.9	0.3-3.1	0.6	4
methylene chloride	75-09-2	35	73	206.2	2.7-1730.0	357.4	4
	108-38-3/						
m/p-xylenes	106-42-3	29	60	0.4	0.2-0.7	0.2	6
2-methylpentane	107-83-5	27	56	0.8	0.3-2.2	0.4	3
n-heptane	142-82-5	22	46	0.6	0.3-1.4	0.3	3
3-methylpentane	96-14-0	21	44	0.8	0.3-2.0	0.4	3
benzene	71-43-2	21	44	0.5	0.3-1.1	0.2	3
methanol	67-56-1	19	40	18.3	12.1-30.6	5.6	4
methylcyclopentane	96-37-7	18	38	0.6	0.3-1.3	0.3	3
cyclohexane	110-82-7	17	35	0.6	0.3-1.6	0.4	2
n-octane	509-84-7	15	31	0.4	0.2-0.8	0.2	3
3-methylhexane	589-34-4	12	25	0.5	0.3-1.1	0.3	1
2-butanone (mek)	78-93-3	10	21	3.4	2.3-5.1	1.0	2
2-methylhexane	591-76-4	9	19	0.4	0.2-0.7	0.2	2
ethylene	74-85-1	8	17	1.2	0.8-1.8	0.4	1
acetylene	2122-48-7	4	8	1.4	0.9-2.4	0.7	1
isoprene	78-79-5	4	8	0.6	0.4-0.7	0.2	0
n-nonane	111-84-2	4	8	0.2	0.2-0.3	0.0	1
2,3-dimethylbutane	79-29-8	3	6	0.4	0.4-0.5	0.1	1
ethanol	64-17-5	3	6	11.4	3.2-19.4	8.1	0
2-methylheptane	592-27-8	3	6	0.3	0.3	0.0	0
1,2,4-							
trimethylbenzene	95-63-6	2	4	na	0.2-0.3	na	0
tetrahydrofuran	109-99-9	1	2	na	2.1	na	0
styrene	100-42-5	1	2	na	0.9	na	0
ethylbenzene	100-41-4	1	2	na	0.7	na	0
cyclopentane	287-92-3	1	2	na	0.4	na	0





Figure 34 : Derrick d'extraction de gaz de schiste en feu en Pennsylvanie – États Unis (Source : voir note 160)

#### 4.2.2. Impact environnemental des émissions atmosphériques : bilan carbone, réchauffement climatique, effet de serre et ozone

Selon un rapport de la Commission européenne, la production d'électricité à partir de méthane a un meilleur bilan carbone que celle générée à partir du charbon avec 41% à 49% d'émissions de gaz à effet de serre en moins par unité d'électricité produite<sup>(161)</sup>. Cependant, le bilan d'ensemble des gaz de schiste est moins bon lorsque sont prises en compte les fuites de méthane. En effet, le méthane est un gaz à effet de serre beaucoup plus puissant que le CO<sub>2</sub> mais son temps de résidence dans l'atmosphère est 10 fois plus faible, ce qui fait que son effet sur le réchauffement climatique s'atténue plus rapidement<sup>(162)</sup>. Sur une période de 20 ans, le méthane est un gaz à effet de serre 105 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub><sup>(163)</sup>, contribuant de 1,4 à 3 fois plus que l'émission directe de CO<sub>2</sub><sup>(164)</sup> d'où le fait qu'il est pointé par le GIEC comme étant une cause importante du réchauffement climatique<sup>(165)</sup>. Les émissions totales liées à l'extraction du gaz de schiste pourraient être jusqu'à 55 % plus élevées que celles attribuables au charbon et 97 % plus élevées que celles provenant du diesel<sup>(166)</sup>.

Selon l'EPA, la réalisation de forages de gaz de schiste libère 230 fois plus de méthane et de composés organiques volatiles que les forages de gaz compris dans des roches réservoir<sup>(166)</sup>. Il a été prouvé que l'exploitation des gaz de schiste est, dans un nombre significatif de cas, plus polluante que le charbon. En effet, sur les 25 000 puits qui sont fracturés chaque année aux USA, 16 millions de tonnes de méthane, 2,2 millions de tonnes de COV et 330 millions de tonnes d'autres polluants aériens s'échapperaient chaque année. On comprend aisément quel impact peut avoir cette industrie extractive sur le réchauffement climatique et sur la pollution atmosphérique<sup>(167)</sup>.

Plusieurs COV participent à la formation d'ozone, sous l'effet combiné de la chaleur et du soleil. Ils interviennent également dans les processus conduisant à la formation des gaz à effet de serre lesquels contribuent au trou dans la couche d'ozone. En plus d'être émis par évaporation, lors de leur extraction et de leur stockage, ils sont émis durant leur utilisation et la combustion de carburants. Un rapport de la commission de la qualité environnementale de l'état du Texas montre que l'industrie pétrolière et gazière de la



région de Dallas-Fort Worth émet plus de COV que la totalité du trafic autoroutier de la région avec une augmentation de 60% depuis 2006. De plus, cet état a dépassé, en 2011, les normes fédérales d'ozone autorisées. La même situation a été rapportée dans le Wyoming où les taux d'ozone ont dépassé de 2/3 les normes autorisées (>124 ppb parties par milliard<sup>(168)</sup>).

### 4.3. Impacts écologiques

#### 4.3.1. Impacts sur la végétation et le paysage

L'occupation au sol d'une plateforme de forage de gaz de schiste est de 2 à 4 ha dont le sol doit être recouvert de ciment ou de goudron pour pouvoir y manœuvrer les engins et forer le puits. A la plate-forme s'ajoutent la route d'accès et le gazoduc pour acheminer les hydrocarbures. A l'échelle d'une région, cela représente des milliers de kilomètres de terres agricoles et de végétation qui ont été sacrifiées avec pour conséquence la dégradation des sols<sup>(169)</sup>, l'envasement des cours d'eau à cause de l'érosion<sup>(170)</sup>, la transformation de la configuration du paysage<sup>(171)</sup>, la fragilisation des écosystèmes et des cours d'eau<sup>(172)</sup>, la perte d'habitats pour les espèces sauvages qui elle-même engendre un fort impact sur la biodiversité<sup>(173)</sup>... D'ici 2030, c'est entre 137 et 332 Km<sup>2</sup> de forêt qui sont menacés de disparaître dans le bassin de Marcellus shale (Pennsylvanie)<sup>(174)</sup>. La déforestation conduit à la fragmentation des habitats faunistiques limitant le déplacement des espèces et, à terme, leur reproduction. Comme le souligne l'association américaine Nature Conservancy, « *le déboisement fragmente la forêt, créant de nouvelles lisières, ce qui change les conditions d'habitat des espèces sensibles qui dépendent des conditions de la forêt profonde* ». De plus, la perte de forêts est associée à l'augmentation du coût de la potabilisation de l'eau<sup>(175)</sup>.

Comparé aux gisements de gaz compris dans des roches réservoir, ceux de gaz de schiste sont de très petite taille et, à production égale de gaz, il faut forer 50 puits de gaz de schiste contre un seul de gaz conventionnel<sup>(176)</sup>. Cette exploitation produit un mitage du territoire dans les régions concernées (figure 35).



Figure 35 : Paysage presque lunaire dans le Colorado. Chaque tache blanche correspond à un puits de forage de gaz de schiste. C'est un véritable mitage du sol qui en résulte. (Source : voir note 177)

Aux États-Unis, la superficie des états producteurs de gaz de schiste est très grande et ils sont très faiblement peuplés (tableau 16). De nombreux pays qui veulent se lancer dans l'exploitation des gaz et huile de schiste ne prennent pas en compte ces données territoriale et démographique, pourtant essentielle, pour évaluer correctement le risque encouru en termes d'impacts environnemental et sanitaire. Par comparaison, la Tunisie est un pays dont la superficie est inférieure à celle de plus de la moitié des états des États-Unis. Pour la région de Kairouan, la superficie du permis accordé à Shell pour forer 742 puits (sur 50 ans), est de 3 780 Km<sup>2</sup>, soit près de la moitié de la superficie du gouvernorat et dans une zone largement plus peuplée que celle des états américains (tableau 16). Ceci laisse présager de l'ampleur et de l'intensité des dommages à subir.

Tableau 16 : Superficie et densité de population d'états producteurs de gaz de schiste aux Etats-Unis en comparaison avec le gouvernorat de Kairouan

Etat (USA)/Gouvernorat	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Densité de population (hab/Km <sup>2</sup> )
Texas	696 241	39,1
Oklahoma	253 554	21,7
Colorado	269 837	19,6
Dakota du Nord	183 272	4,0
Wyoming	181 196	2,3
<b>Tunisie</b>	<b>163 610</b>	<b>68,9</b>
<b>Kairouan</b>	<b>6 712</b>	<b>85</b>

#### 4.3.2. Impact sur la faune

En plus des conséquences de la perte de son habitat, la faune sauvage peut être exposée aux fluides de fracturation, au méthane et à d'autres contaminants liés aux forages gaziers. Au Kentucky, une importante mortalité de poissons a été enregistrée, suite à la fuite du liquide de fracturation provenant de puits situés à proximité du cours d'eau (figure 36). Certains des poissons survivants ont développé des lésions au niveau des branchies, du foie et de la rate<sup>(178)</sup>. En Ohio, 70 000 poissons, grenouilles, écrevisses et salamandres sont morts suite à un incendie sur un site de forage qui a fait exploser des camions contenant des adjuvants chimiques destinés à la fracturation<sup>(179)</sup>. Des communautés de bactéries, composantes essentielles du fonctionnement des écosystèmes, dans un cours d'eau, aux abords de puits d'exploitation de gaz de schiste, ont vu leur diversité baisser et leur abondance se modifier en raison de l'acidification de l'eau due aux pluies acides ou des activités de fracturation<sup>(180)</sup>.

Fin 2010, dans la ville de Beebe (Arkansas), plus de 3 000 oiseaux morts tombent du ciel (figure 37). Le lendemain, et non loin de là, ce sont près de 100 000 poissons qui flottent à la surface de la rivière Arkansas près d'Ozark (Arkansas). Les autorités ont été incapables d'expliquer ce phénomène tout en insistant sur le fait que les deux évènements n'étaient pas liés ! La thèse jugée la plus plausible incrimine pourtant l'exploitation de gaz de schiste du gisement de Fayetteville situé à quelques dizaines de kilomètres. En effet, dans les 48h qui ont précédé ces mortalités massives, la région a été secouée par six tremblements de terre (près de 400 sur toute l'année). Les vibrations, dues aux fracturations répétées, ou l'injection à très forte pression des eaux usées dans des puits de récupération (voir

chapitre 4.4), a très probablement induit des fissures dans les couches géologiques qui ont laissé s'échapper des gaz mortels à la surface<sup>(181)</sup>. La vérité n'est toujours pas établie.



Figure 36 : Mortalité de poissons dans le cours d'eau de Fork Creek (Kentucky) en 2007 suite au déversement de liquides de fracturation hydraulique de puits d'exploitation de gaz de schiste dans la région. (Source : voir note 182)



Figure 37 : Hécatombe d'oiseaux à Beebe dans l'Arkansas fin 2010. (Source : Association toxicologie chimie)

#### 4.4. Séismes

L'exploitation des hydrocarbures non conventionnels par la technique de la fracturation hydraulique peut engendrer des tremblements de terre de magnitude relativement importante. Cette thèse a jusqu'ici été réfutée par les industriels et quelques scientifiques dont les recherches sont subventionnées par ces mêmes industriels, et qui admettent de « légères » secousses imperceptibles par les humains. Les dernières études scientifiques démontrent pourtant un peu plus le lien entre les techniques d'exploitation des huiles et gaz de schiste et des séries de séismes observées aux États-Unis. La première observation est la fréquence des secousses et la deuxième est leur localisation aux abords des zones d'exploitation. En 2012, au congrès annuel de la Société géologique américaine, l'US Geological Survey (USGS), a présenté des travaux montrant qu'en Oklahoma le nombre annuel de séismes de magnitude supérieure à 3 a été multiplié par 20 entre 2009 et 2011, par rapport au demi-siècle précédent. Des secousses sismiques de magnitude 1 à 3 sur l'échelle de Richter ont été enregistrées aux abords des zones de forage comme dans l'Oklahoma, l'Arkansas, l'Ohio, le Texas, la Californie, le Colorado, l'Allemagne et la Suisse<sup>(183)</sup>. Entre 2010 et 2011, une vague de tremblements de terre a secoué l'état de l'Arkansas, riverain du gisement de gaz de schiste de Fayetteville. En tout, 54 tremblements de terre

ont frappé la région en 2010 et 157 en 2011. Le plus violent a atteint une magnitude de 4,7 le 27 février 2011<sup>(184)</sup>. Verdict du Centre de recherche et d'information sur les tremblements de terre (CERI) de l'Université de Memphis : il existe un lien entre cette activité industrielle et les séismes<sup>(185)</sup>. Début 2015, la Société américaine de sismologie a publié une annonce concernant le lien prouvé entre les opérations de fracturation hydraulique et la série de secousses aux abords d'un site d'exploitation dans l'Ohio. Le calendrier des dates des opérations de fracturation était parfaitement synchronisé avec l'enregistrement des secousses par les sismologues<sup>(186)</sup>. Les fracturations répétées fragilisent les failles dans le sous-sol, provoquant ainsi des mouvements tectoniques (glissement). La même explication a été apportée pour les tremblements de terre qui se sont produits à Blackpool, en Grande Bretagne, en 2011. Un géologue, pourtant engagé par l'exploitant, Cuadrilla, a démontré que les séquences de fracturation coïncidaient avec les secousses<sup>(187)</sup>.

La fracturation hydraulique peut aussi être indirectement responsable des secousses telluriques. C'est ce que démontrent de nouvelles recherches publiées dans le *Geophysical Research-Solid Earth* révélant que la fracturation hydraulique induit des tremblements de terre<sup>(188)</sup>. Une analyse de la séquence d'événements ayant précédé et suivi le séisme de magnitude 5,7 qui a frappé la ville de Prague en Oklahoma le 6 novembre 2011 démontre un lien causal entre l'injection de fluides de fracturation dans le sous-sol et la survenue du tremblement de terre<sup>(189)</sup> (figure 38). Même conclusion pour la série de 120 tremblements de terre, enregistrée en une seule année (2013), au Kansas<sup>(190)</sup>. En réalité, les géologues savent depuis 50 ans que l'injection du fluide sous la terre peut faire augmenter la pression sur les failles sismiques et les rend plus susceptibles de glisser. Le résultat est souvent un séisme dit « induit ». Des sismologues viennent de découvrir des preuves que les puits d'injection (stockant à long terme les eaux résiduelles de la fracturation) peuvent provoquer des séismes plus dangereux. Du fait que la pression des puits d'eau sales stresse les failles à proximité, si des vagues sismiques venant de la surface de la Terre frappent la faille, cette dernière pourrait rompre, et produire quelques mois plus tard un séisme plus fort (magnitude 5) qui peut être suffisamment puissants pour détruire des bâtiments<sup>(191)</sup>.



Figure 38 : Le tremblement de terre-magnitude 5,7- près de Prague (États-Unis) qui s'est produit en 2011, déclenché par l'injection des eaux usées de fracturation dans des formations géologiques profondes. Source : John Leeman<sup>(192)</sup>

En Tunisie, la région de Kairouan présente une sismicité historique relativement élevée par rapport au reste du pays<sup>(193)</sup> (Figure 39). Un séisme de forte intensité a frappé la ville de Kairouan en 854. Deux séismes ont été enregistrés dans la région de Kairouan, les 12 août 2001 et 24 juin 2002 dont les magnitudes ont été estimées respectivement à 4,3 et 4,6.

Dans la mesure où de plus en plus d'études scientifiques apportent ainsi la preuve de la corrélation entre l'utilisation de la technique de fracturation hydraulique et le déclenchement de secousses sismiques, de nombreuses questions se posent quant à la capacité de la géologie du bassin du Kairouanais à résister aux fortes pressions générées par l'envoi du fluide de fracturation à très forte pression dans les puits de forage ou au stockage des eaux récupérées dans des puits anciens. Durant l'été 2014, des habitants de la région de Ould Nsir (délégation de Bouhajla) se sont déjà plaints que leur maisons avaient été fissurées suite à des secousses dues aux opérations de forage incessants effectuées à proximité par une compagnie pétrolière canadienne<sup>(194)</sup>.

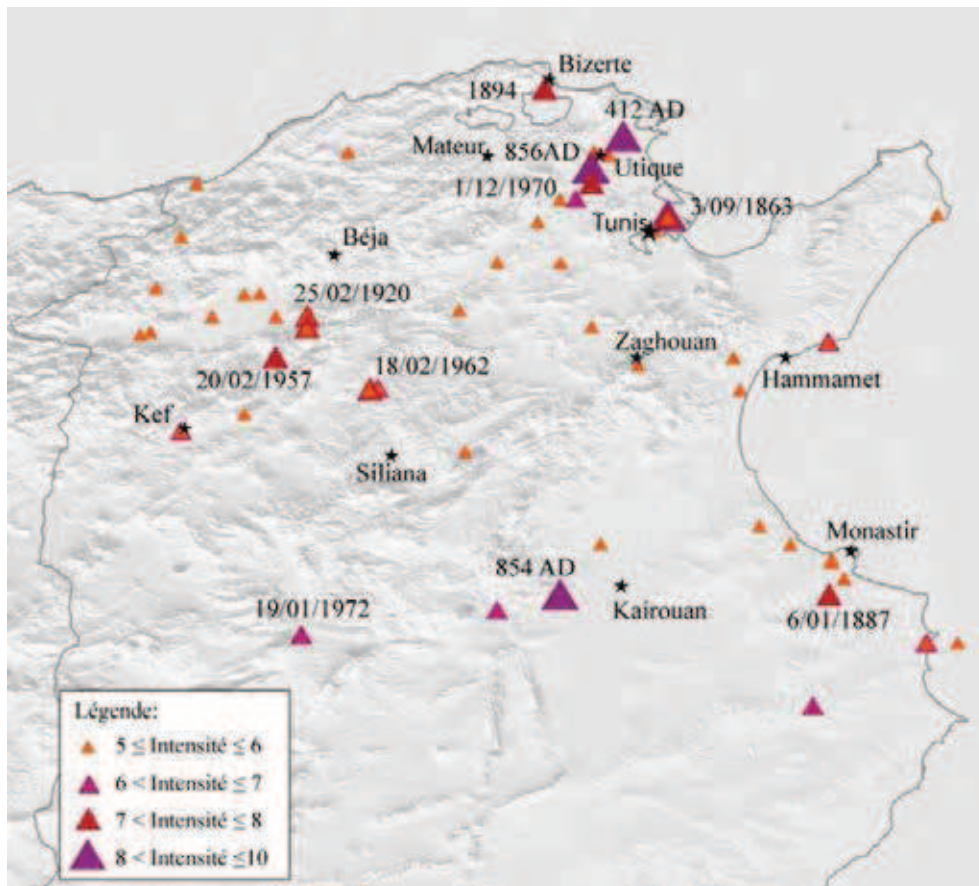


Figure 39 : Carte de la sismicité historique de la Tunisie (le Sud du pays ne montre pas de sismicité historique ; données de l'Institut national de la météorologie)