

# UN PUNTO DE VISTA SOBRE LAS NECESIDADES Y LOS ABASTECIMIENTOS DE ENERGÍA HACIA 2050\*

Pierre-René Bauquis\*\*

Aunque existan planes múltiples y contrastados, la mayoría de los previsionistas nos indican que se debería duplicar el consumo de energía primaria comercial de aquí a 2030, pasando de 9 a 18 Gtep y aproximadamente triplicar de aquí a 2050, pasando a 25 ó 30 Gtep. De acuerdo con estos estudios, en el mejor de los casos, las energías fósiles sólo deberán representar en 2050 los dos tercios de estos consumos con respecto al 85 % actualmente.

El objeto de este artículo es "volver a considerar" las hipótesis subyacentes en esta visión de nuestro futuro durante el próximo medio siglo y proponer un punto de vista sobre el balance energético del planeta en 2050. Esto puede parecer ilusorio en la medida en que, por ejemplo, no sabemos cuál puede ser el impacto de las eventuales rupturas tecnológicas más allá de 2010 o de 2020, y el impacto de las posibles rupturas económicas o demográficas. Ignoramos también (y esto es probablemente lo más importante) si vamos hacia una Humanidad en la que los comportamientos racionales terminarán por determinar las decisiones fundamen-

tales en materia de sociedad o si lo irracional, en todas sus formas, seguirá teniendo gran importancia. Esto no lo sabemos, pero el futuro de las energías depende en gran parte de ello: en efecto, lo que importa no es la realidad como la definen los científicos, sino lo que perciben y desean las personas. Esta es la esencia misma de la democracia y, para el futuro de las energías, un factor clave: toda la problemática del Desarrollo Sostenible y los debates relativos a los problemas del medio ambiente dependen de ello. La aceptación o no de los riesgos relacionados con el efecto invernadero, el sector nuclear y los transportes individuales determinará la estructura de nuestros consumos energéticos en un medio siglo. Igualmente, la aceptación o no de los riesgos relacionados con las modificaciones genéticas determinarán en este mismo horizonte las respuestas que se dará al asunto de la "competencia por la tierra" entre biomasas alimentarias y biomasas energéticas.

La multitud de preguntas es tal que nos contentaremos con enfocar algunos asuntos claves: el crecimiento económico, el futuro demográfico, la cuestión de los recursos y de las reservas de carbono fósil (petróleo, gas y carbón), la cuestión del futuro

de las energías renovables y el de las energías nucleares. Propondremos como conclusión un "balance energético 2050" que de ninguna manera pretende ser más exacto que todos los balances existentes, pero que constituirá la síntesis de nuestras reflexiones.

## EL CRECIMIENTO ECONÓMICO

En el transcurso de los últimos veinte años, se ha observado un inicio de separación entre crecimiento económico (medido por el crecimiento de los PNB) y consumos energéticos. Este fenómeno está relacionado, por una parte, con la desmaterialización de los PNB y, por otra, a las economías de energías, es decir, a la eficacia energética siempre creciente de los procesos industriales y a la mejora de la eficacia energética de los consumos relacionados con la calefacción o la climatización, la iluminación, el uso de aparatos electrodomésticos o de medios de transporte (automóviles, aviones, etc.). Sin embargo, existe un factor que interviene en sentido inverso y que resulta del hecho de que los aumentos de PNB se traducen en una demanda más que proporcional de las necesidades o deseos de transporte o de las necesidades o deseos de confort. En parti-

\* Conferencia pronunciada en el Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Bilbao.

\*\* Presidente de la Association Française des Techniciens et Professionnels du Pétrole (1999-2000), Vicepresidente del Institut Français de l'Energie (1999 - Dic. 2001), Asesor particular del Presidente de TotalFinaElf (1998- Dic.2001), Profesor Asociado del IFP School (Institut Français du Pétrole) desde enero 2002

Nota: El autor agradece en particular por sus observaciones y consejos a Paul Alba, Emmanuelle Bauquis, Denis Babusiaux, Jean-Claude Boudry, Georges Dupont-Roc, Jacques Foos y Roland Geoffrois.

Nota: Este texto ha sido publicado inicialmente en la Revue de l'Energie (número especial 50o aniversario N° 509-Sept. 1999). La publicación original no incluía los gráficos ni los cuadros; el epílogo ha sido redactado con respecto al texto original

cular, esto es cierto en las economías emergentes cuyas poblaciones aspiran masivamente a un modo de vida y de consumo que es el de los países más ricos. Ahora bien, estas economías deben precisamente representar lo esencial del crecimiento económico y demográfico del próximo medio siglo.

Las resistencias ideológicas que pueden obstaculizar estas aspiraciones (ultraecologismo, nuevas éticas, nuevas lecturas de las grandes religiones) no parecen hoy ser capaces de modificar de manera considerable estas aspiraciones transmitidas por una globalización de las comunicaciones. Pero ¿qué ocurrirá después de 2020?

Actualmente, nadie puede saberlo y es ésta precisamente una de las dificultades mayores de las previsiones a largo plazo: Sabemos extrapolar tendencias mediante modelizaciones más o menos elaboradas pero, debido a su carácter mismo, no se pueden modelizar las rupturas de comportamiento.

### EL FUTURO DEMOGRÁFICO

No se requiere disponer de estudios demográficos eruditos para recordar que hace cincuenta años las italianas y españolas tenían dos o tres veces más niños que las alemanas o las suecas, mientras que hoy las hijas de las mismas italianas o españolas dan a luz a menos niños que las alemanas o suecas. Si no hay movimientos migratorios, éstas ya no asegurarán la renovación de las generaciones.

Estos mismos fenómenos de ruptura en los comportamientos en materia de natalidad aparecieron más recientemente en el resto del contorno mediterráneo, en Túnez, Marruecos, Turquía, Egipto y últimamente, pero con mucho vigor, en Argelia.

No se ve lo que impediría la amplificación y la extensión en los próximos años de estos fenómenos a otras zonas de alta natalidad. La cuestión clave en materia de demo-

grafía se resume en el concepto un poco misterioso del "deseo de tener niños", fenómeno muy cultural y por lo tanto muy variable en una época en la que los esquemas culturales cambian también muy rápido, incluso cuando los esquemas religiosos permanecen poco modificados. Estos esquemas culturales son ampliamente el asunto de medios de comunica-

habitantes ( $\pm 2.000$  millones) y no de 10.000 millones ( $\pm 1.000$  millones) como se considera generalmente.

### RECURSOS Y RESERVAS DE CARBONO FÓSIL

Esta cuestión es una de las más controvertidas en el seno de las industrias energéticas: Pesimistas y optimistas se enfrentan acerca de es-



ción de masas y se relacionan en particular con la globalización de la televisión que proyecta ya en todas las aldeas del planeta un modelo de ideal familiar de tipo norteamericano o europeo.

Durante los veinte o treinta próximos años, la difusión de Internet en estas mismas aldeas reforzará aún más la globalización de los esquemas culturales: Gracias a la energía solar fotovoltaica, se puede suponer que la mayoría de las tiendas tuareg o de las yurtas mongolas estarán equipadas antes de 2020 con televisores, teléfonos portátiles y acceso a las redes mundiales de información.

Dado que la cuestión demográfica está en el centro de la problemática de las necesidades a largo plazo en materia energética, haremos un pronóstico que refleja el posible impacto de las observaciones precedentes: En 2050, la población mundial será muy probablemente de 8.000 millones de

te tema desde hace más de cincuenta años(1). En efecto, desde el inicio de los años 1930, aparecen artículos sobre el próximo agotamiento de las reservas petroleras, pero también aparecen en 1999 artículos muy serios para explicar que éste es un "falso problema" y que estudiar el agotamiento de las reservas no tiene verdaderamente sentido. En efecto, la rarefacción de las reservas es, por definición, autocorrectora mediante alzas de precio que engendran tanto la creación de nuevas reservas con base en existencias dadas de recursos como la reducción de la demanda.

- La cuestión de las reservas (cantidades que se puede producir técnica y económicamente) de carbono fósil, en sus formas sólidas (carbón), líquidas (petróleo) o gaseosas (gas natural) no es un falso problema, sino un problema real. Los recursos (cantidades totales existentes en tierra, producibles o no económica-

## La observación de las "reservas probadas" da un sentimiento de abundancia creciente



ción de las producciones (principios de los años 1970). Parece lógico pensar que el mismo fenómeno se reproducirá a escala del planeta.

- En una óptica a largo plazo, es decir, en el horizonte de 2050, la distinción detallada de los recursos según sus categorías físicas (sólidos, líquidos, gases) sólo presenta un interés relativo dado que existen puentes tecnológicos que permiten transformar recursos de una categoría en producción de otra categoría. En efecto, se puede gasificar carbón o residuos petroleros, y se puede producir hidrocarburos líquidos con base en gases (por ejemplo, por conversión en productos petroleros mediante

mente) constituyen existencias finitas de energía solar concentrada (biomasas fósiles) que no se sabe medir con precisión, en particular en lo que concierne las formas sólidas (carbón, lignito, esquistos bituminosos, hidratos de gas).

- En cambio, para las formas líquidas (petróleos) o gaseosas las dudas son claramente menores y las "existencias en tierra", o recursos, pueden estimarse hoy probablemente con mayor precisión, digamos de más o menos un 30 % para el petróleo y de más o menos un 50 % para los gases en forma gaseosa (pero no en la forma sólida que constituyen los hidratos).

- En el caso de los petróleos y de los gases llamados convencionales, tres fenómenos han ocultado prácticamente el proceso de rarefacción progresiva del descubrimiento de nuevos yacimientos, a saber:: La apertura de nuevos territorios a las inversiones internacionales en el ámbito de la exploración y de la puesta en producción, la transformación progresiva de recursos no convencio-

nales en reservas convencionales (offshores profundos, ultrapesados, etc.) y, sobre todo, la importante reevaluación de las reservas de los yacimientos ya descubiertos. Este último fenómeno ha ocultado dos hechos: Por una parte, las visiones en materia de reservas últimas recuperables no han cambiado prácticamente durante los últimos 30 años para los petróleos llamados convencionales y, por otra, la exploración ya no renovarían los volúmenes consumidos.

Estos fenómenos de revaluación tienen en sí dos causas vinculadas muy confusamente: La subevaluación de los volúmenes existentes (recursos) en el momento de su descubrimiento y la mejora con el tiempo de las tasas de recuperación esperadas gracias a la evolución tecnológica.

En total, los fenómenos antes mencionados explican la razón por la que habrán transcurrido casi treinta años en EE.UU. entre el momento en que los nuevos descubrimientos ya no lograban compensar el aumento de los consumos (final de los años 1930) y el comienzo de la disminu-

procedimientos de tipo Fisher Tropsch, o procedimientos de producción de alquenos con base en metanol, o incluso la homologación directa del metano en esencias). Se tiene entonces un continuum de recursos de carbono fósil de donde se podrá extraer una parte más o menos grande de producciones en la forma que se desee para alimentar los diferentes mercados, y esto en función de los parámetros técnicos y económicos que prevalecerán en 2050. Entre estos parámetros económicos, las condiciones relativas a la protección de nuestro medio ambiente tendrán gran importancia, y esto mucho antes de 2050. Por ejemplo, si se logra de aquí a 2010 ó 2020 un consenso sobre la gravedad del efecto invernadero, se deberá –de una u otra forma (gravamen, permisos negociables, etc.) – definir un "coste" relacionado con la emisión de carbono a la atmósfera para que el mercado asegure una regulación racional de estas emisiones. La aparición de un coste relacionado con la citada emisión de carbono, considerada hoy co-

(1) Publicaciones del autor relativas a las reservas petroleras:

- Revue de l'IFP, vol. 27, n° 4, julio-agosto de 1972, páginas 631-658: "Les réserves de pétrole et les perspectives de production à moyen et long terme" por P.R. Bauquis, R. Bresseur, J. Masseron.

- Energies n° 35. Primavera de 1998 páginas 11 y 12 - "L'effet de serre et les réserves énergétiques".

- "What future for extra heavy oil and bitumen: the Orinoco Case" 17 Congreso del Consejo Mundial de la Energía, Houston, septiembre de 1998

mo probable, perjudicaría ligeramente la gasificación del carbón pero sobre todo afectaría masivamente la "conversión" del gas en líquidos, ya sea éste gas natural... o el resultado mismo de procesos de gasificación de sólidos (carbones, alquitranes, biomásas, etc.). Al contrario, este coste de emisión del carbono favorecería, según muchos autores, la emergencia de daría una gran importancia al hidrógeno, lo que supone que sepamos controlar a costes no muy elevados la reinyección del gas carbónico.

- En lo que concierne al paso de los recursos a las reservas, insistiremos sobre el factor que nos parece más importante, el de la diferencia entre petróleo y gas. En materia de petróleo, las tasas de recuperación "naturales" o primarias son bastante bajas en particular para los petróleos pesados: En efecto, hoy están en promedio claramente inferiores al 30 % (para todas las calidades). En el futuro, se les puede mejorar considerablemente gracias a la tecnología, y esto tanto más cuando se trate de recursos de alta densidad o de alta viscosidad. Lo mismo no ocurre con el gas, producto para el que prácticamente no existe esta problemática cualitativa y para el que las tasas de recuperación naturales son altas, aproximadamente del 70 al 80 %, excepto en los casos marginales de depósitos de calidad muy mediocre.

De estas características, resulta que, en una óptica a largo plazo, de tipo 2050, se tiende a estimar las reservas petroleras subestimando la "creación de nuevas reservas" mediante mejora de las tasas de recuperación, en particular para las calidades más pesadas, como lo ilustra el inicio de la valorización de los crudos ultrapesados o betunes de la cintura del Orinoco en Venezuela.

De esto resulta también que se puede cometer el error inverso en lo que concierne las reservas de gas: La tecnología no puede en este caso crear nuevas reservas mediante mejora

de las tasas de recuperación, excepto de manera marginal (por ejemplo, fractura y drenajes horizontales en depósitos muy poco permeables).

En el caso del gas, la exploración está menos avanzada que para el petróleo, los descubrimientos de nuevos campos hacen que las estadísticas de reservas sigan aumentando y esto durante algunos años, tal vez diez o veinte. En cambio, cuando los consumos lleguen a ser superiores a las nuevas reservas aportadas por la exploración, las reservas disminuirán rápida e inexorablemente sin que el progreso tecnológico ni el alza de los precios relacionada con la rarefacción puedan tener un efecto.

Añadiremos algunas palabras sobre las formas sólidas del petróleo y del gas, que son las "reservas del

tura de los yacimientos (caso de las arenas Athabasca, en Canadá). Nos parece que se justifica esta distinción, al menos en el plano pedagógico, dada que la diferencia entre arenas bituminosas y esquistos bituminosos es importante. Las primeras son verdaderos petróleos brutos que han migrado, que se han vuelto "pesados" por oxidación o biodegradación mientras que los otros son en realidad querógeno o, si se quiere "rocas madres" que no han terminado la transformación de su materia orgánica en petróleo y para las que entonces no han podido tener lugar los procesos de expulsión y migración.

En cuanto a la contribución de los esquistos y de los hidratos a las reservas en el horizonte 2050, pensa-

### La observación de la "parte invisible" del iceberg da una visión diferente

Reservas mundiales últimas de crudos convencionales

1973

2000

G barriles

2000 - 3000

2000 - 3000

Entre 1973 y 2000, no hubo prácticamente ningún aumento en la estimación de las reservas últimas convencionales.

United Petroleum - Janvier 2003, 2004

United Petroleum SA

Jornada de la Energía del 14 al 16 de mayo de 2004

mañana" según muchos autores. Se trata entonces de saber si, en el horizonte de 2050, se podrán transformar los esquistos bituminosos o los hidratos de gas en reservas petroleras o de gas de un volumen importante. De manera un poco convencional, hemos elegido incluir únicamente los esquistos bituminosos entre las formas de carbono sólido y no las arenas bituminosas y los petróleos ultrapesados, incluso cuando éstos están en estado pastoso o claramente "fijo" debido a las condiciones de tempera-

mos que en esta fecha estos dos recursos serán todavía probablemente las reservas del mañana.

### EL FUTURO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

El final del siglo XX ha sido el periodo de redescubrimiento de estas energías ancestrales gracias a nuevas tecnologías de implementación; estamos aún hoy en la fase inicial de este fenómeno. El estar actualmente en esta fase es poco favorable para evaluar de manera correcta el potencial

de estas energías durante el próximo medio siglo.

En efecto, en la fase actual de reinicio de estas energías, se pueden observar muy altas tasas de crecimiento, del 20 o incluso del 30 % anual; en ciertos sectores como el solar fotovoltaico, la energía eólica o los biocarburantes. Es grande la tentación de extrapolar durante un largo periodo las tendencias recientes observadas durante un corto periodo, olvidando la fragilidad de estas extrapolaciones.

Entre las cuestiones que plantea el futuro de las energías renovables, una de las más importantes es la de los tipos de ayudas que conviene implementar para acelerar su desarrollo. En primer lugar, en materia de investigaciones tecnológicas, conviene recordar que cada ámbito de conocimientos progresa en función de su propia lógica, en un momento dado.

Hoy, las energías renovables requieren esfuerzos de investigación pero, para que éstos sean eficaces, deben corresponder a una lógica muy descentralizada e irrigar muchos pequeños equipos. No se trata entonces, si se quiere ser eficaz, de créditos masivos atribuidos a este sector: No conviene subvencionar los laboratorios de investigación, ni las empresas sino, durante cierto tiempo, el precio de las energías que éstos suministrarán a los mercados.

Esta es una lógica casi contraria a la de la investigación necesaria para el desarrollo de las energías nucleares que requieren que se recurra a gastos masivos y muy centralizados en materia de Investigación y Desarrollo.

En lo que respecta a las energías renovables, el enfoque correcto es el de los Certificados verdes u otros métodos análogos que permiten añadir una prima al valor de la electricidad producida por los sectores renovables o sólo algunos de estos sectores, si se desea orientar considerablemente estos mecanismos de

## Electricidad de origen renovable en 1995 y 2050\*

Fuente: Revue de l'Énergie, 50 años, n° 539 Sept. 99.

	Potencias instaladas MW		Electricidad generada TWh	
	1995	2050	1995	2050
Hidráulica	700.000	1.000.000	2.400	3.000
Eoliana	5.000	200.000	10	500
Biomasa (sectores elect)	10.000	100.000	50	500
Geotermia	7.000	20.000	30	100
Solar (fotovoltaica)	600	30.000	1	100
Solar térmica	-	-	10	50
<b>Total</b>	<b>722.600</b>	<b>1.350.000</b>	<b>2.501</b>	<b>4.250</b>

\* Equivalencia elegida para la electricidad: el sector nuclear y los sectores renovables han sido contabilizados como si hubieran sido generados por un sector térmico con un rendimiento del 40% (convención utilizada por el grupo TOTAL) del cual más del 95% de grandes plantas hidráulicas.

Solex Finances, November 2000, 2001

Journal de l'Énergie del 14 al 16 de mayo de 2001

ayuda. No pasaremos revista a los diferentes sectores de las energías renovables y presentaremos directamente nuestras propias conclusiones.

Éstas están resumidas en forma de dos cuadros de síntesis relativos al balance de las energías renovables que se convertirán en electricidad en el horizonte de 2050 y que lo comparan al último balance coherente, relativo al año 1995. A primera vista, este balance debería cubrir aproximadamente los 4/5 de las energías renovables consumidas en el horizonte de 2050.

De los dos cuadros anteriores se concluye que en el horizonte de 2050 las energías renovables (excepto la gran hidráulica) solamente tendrán una función suplementaria en materia de balances energéticos. Incluso con un esfuerzo importante, se debe constatar que, entre 1995 y 2050, la parte de las energías renovables en los balances eléctricos debe disminuir y no aumentar considerablemente como muchos lo piensan.

Esto no significa que no haya que interesarse, sino al contrario. Pero no hay que pensar que estas energías ofrecen una alternativa fiable a la otra familia de energías no fósiles como las energías nucleares. Sin embargo, existe una posibilidad de crecimiento claramente mayor de las energías re-

novables que lo que hemos considerado y que concierne a una innovación tecnológica de las modificaciones genéticas, que perturbaría las perspectivas en materia de biomasa. *A fortiori*, la puesta a punto de la síntesis clorofílica puede también tener un impacto mayor.

## FUTURO DE LAS ENERGÍAS NUCLEARES

Utilizaremos a la vez el singular y el plural pero la conclusión de este párrafo indicará por qué hemos elegido una formulación en plural en nuestro título. En primer lugar, recordemos el balance hasta hoy de esta energía: Asegura el 18 % de la producción eléctrica mundial, es decir el 6 % del consumo energético.

En conjunto, el parque mundial actual de centrales nucleares es de tipo relativamente homogéneo, dado que se trata casi totalmente de centrales de fisión "clásicas", no supergeneradoras, con variantes de sector que no abordaremos excepto para recordar la importancia muy dominante de una de ellas, la de las centrales de agua a presión (PWR). Estas centrales utilizan ciclos de uranio enriquecido y combustibles, ya sea clásicos con un 3,5 % de U 235, ya sea de tipo MOX con plutonio. Estas centrales tienen un muy buen nivel de fiabilidad. Esta industria ha tenido sólo un

accidente importante en el plano mundial: el de la central de Chernobyl, que el personal del sector nuclear califica como accidente soviético y no como accidente nuclear. Sin embargo, mediante esta fórmula, ponen de manifiesto el posible talón de Aquiles de las centrales nucleares en materia de fiabilidad: Un riesgo mayor no puede provenir de un fallo técnico sino más bien de condiciones humanas o políticas aberrantes (atentados, guerras civiles o no civiles, etc.). En cambio, no sabemos calcular el riesgo de fallo de una central explotada en condiciones normales, riesgo medido en términos de probabilidad de deceso ocasionado por tal fallo. Se sabe llevar estos riesgos propiamente técnicos a niveles inferiores a aquellos que permiten funcionar a cualquier otra gran actividad industrial, sin hablar de riesgos aceptados mucho más elevados como el consumo de tabaco, la utilización de los coches o la profesión de plomero.

Otra objeción clásica frente al sector nuclear concierne a las incógnitas de los fines de ciclo: qué hacer con los combustibles irradiados, (vueltos a tratar o no), almacenamiento de los desechos, desmantelamiento de las centrales y otras instalaciones nucleares después del final de su vida. Acerca de estas cuestiones, existe claramente una falta de comunicación de parte de la industria nuclear que ya sabe o sabrá solucionar estos problemas recurriendo ya sea a técnicas ya elaboradas, ya sea a otras de las que se está razonablemente seguro que podrán elaborarse en plazos satisfactorios, y a costes que no pondrán en duda los precios de coste del kWh nuclear.

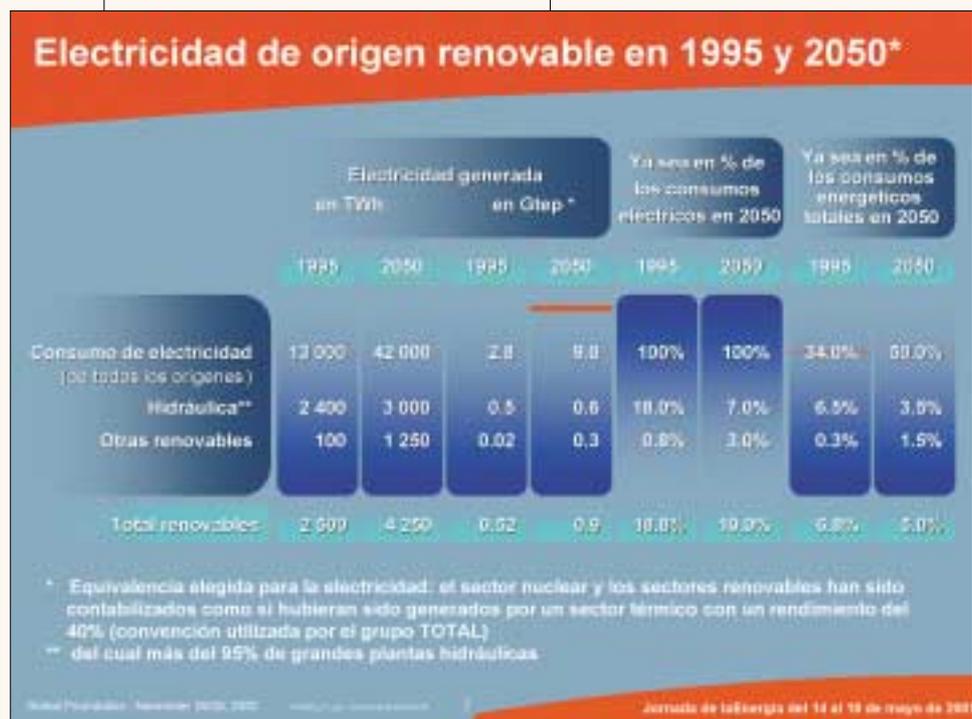
La tercera gran cuestión concierne las reservas de combustibles fósiles, es decir con los ciclos actuales, las reservas de uranio. Afortunadamente, se puede reducir considerablemente el "contenido de corte" o riqueza mínima de los mine-

rales explotados (en última instancia, el agua de mar es un mineral de uranio), sin aumentar considerablemente el precio de coste del kWh nuclear, dado que el coste del combustible contribuye en un porcentaje muy bajo al precio de coste.

En segundo lugar, si el encarecimiento relacionado con la rarefacción de los recursos se convirtiera en una condición, se debería poder en 15 ó 20 años reactivar el sector de los supergeneradores que permiten multiplicar de manera muy importante (aproximadamente de 30 a 40 veces) la cantidad de electricidad producida con una cantidad dada de uranio. A este propósito, sorprende que se haya abandonado el prototipo más elaborado en el plano mundial de este sector, es decir, la central Superphénix. Como se sabe que hacia 2050 puede plantearse un problema de reservas de uranio y que, por otra parte, este tipo de reactor debería contribuir a solucionar problemas de "fin de ciclo" de los combustibles nucleares, se hace difícil entender la racionalidad de esta decisión. La lógica y la aplicación del "principio de precaución" frente al riesgo del efecto invernadero indicaban más bien que se explotara esta central durante un largo periodo y al máximo de su capacidad de utilización considerada como "se-

gura" por las autoridades competentes. Esto hubiera permitido sacar durante 30 a 40 años todas las conclusiones sobre una verdadera utilización industrial: evaluación de los costes reales y de mantenimiento, problemas de envejecimiento, fiabilidad, etc. El valor de tal experiencia habría justificado ampliamente una explotación de esta central a largo plazo, incluso si esta explotación hubiera ocasionado un coste anual neto, lo que en marginal parece poco probable.

Finalmente, el futuro del sector nuclear, a largo plazo, no se limita a los solos ciclos ya probados actualmente en el plano industrial. En primer lugar, existe la necesidad de disponer de aquí a 2010 ó 2020 de centrales nucleares de pequeña potencia (100 a 500 MW), de gran fiabilidad y fáciles de utilizar: El sector de alta temperatura con refrigeración por helio parece hoy bien situada para responder a estas necesidades. Por otra parte, se puede considerar ciclos diferentes que disminuirían aún los riesgos de sobrecalentamiento y fusión del núcleo de un reactor, como el propuesto por el premio Nobel de Física Carlo Rubbia: Se trata de reactores llamados de "fragmentación del núcleo" cuyo funcionamiento requiere un flujo exterior de partículas y que pararían automáticamente apenas se



saliera en cierto margen de las condiciones de funcionamiento. A continuación, existe, a muy largo plazo, la fusión: Sin participar en los debates relativos a la fusión en caliente y en los que se vinculan a la fusión en frío, se puede, sin embargo, pensar que estas energías ampliarán probablemente, a su vez, a largo plazo la rica paleta de las energías nucleares. Por ello hemos preferido la forma plural de energías nucleares más bien que recurrir al singular en el título de este párrafo.

En resumen, parece imposible considerar la energía nuclear como un accidente sin perspectivas de la historia energética: Ésta estará nuevamente en el centro de nuestras preocupaciones mucho antes de 2050.

## UNA VISIÓN DEL BALANCE ENERGÉTICO MUNDIAL EN EL HORIZONTE DE 2050

Nos basaremos en el siguiente enfoque: Intentaremos evaluar las posibles producciones de las diferentes energías fósiles en 2050, dadas las reservas y los costes, y por diferencia con un margen de evaluación de las necesidades en materia de energía, las cantidades que deberían proporcionar las energías no carbonadas en este horizonte.

Veamos primero cuáles pueden ser en 2050 las producciones de las energías fósiles.

En lo que concierne al carbón, las condiciones no dependen de los "recursos" (cantidades en tierra) sino, por una parte, de las reservas (cantidades explotables económicamente en 2050) y, por otra, de los problemas de condiciones de emisión de gas carbónico, sin olvidar las emisiones de azufre, metano, partículas y cenizas, factores de contaminación no sólo locales sino regionales y planetarios. En efecto, se puede retener lo fundamental de las partículas emitidas en futuras centrales eléctricas que funcionen con carbón (en particular si se recurre a la gasi-

ficación) pero no se puede retenerlas para millones de hogares domésticos. Esto también es cierto para el azufre y, en lo que concierne al metano, no hay que olvidar que una explotación carbonera es un yacimiento de "coal bed methane" que emite directamente a la atmósfera.

Dados los costes muy elevados de la logística carbonera terrestre (aún más elevada a la unidad de energía transportada que la del gas) no se convertirá en reservas en el horizonte de 2050 una buena parte de los recursos, incluso teniendo en cuenta el potencial de producción convertible en electricidad en los lugares de producción (con o sin gasificación). Por otra parte (y es tal vez lo más importante) las informaciones disponibles sobre las reservas de carbón permiten suponer confusiones entre reservas y recursos. Es hora de que esta industria se obligue a hacer esta distinción con bases razonablemente homogéneas con las utilizadas por los productores de gas, que, en cambio, casi nada publican sobre sus recursos...

Debido a estos diferentes factores y sin que sea posible hacer aquí una demostración, la producción mundial de carbón y lignito podría pasar de 4,8 Gt (es decir, 2,2 Gtep/año) con un margen de 8 a 10 Gt (es decir, 4 a 5

Gtep/año), en el horizonte de 2050: Esto supone, (y es una hipótesis discutible) que las condiciones relativas a la emisión de CO<sub>2</sub>, no tendrán un impacto mayor. Correremos entonces el riesgo de afirmar que los hombres aceptarán un riesgo "efecto invernadero" muy superior al que parecería hoy como razonablemente aceptable.

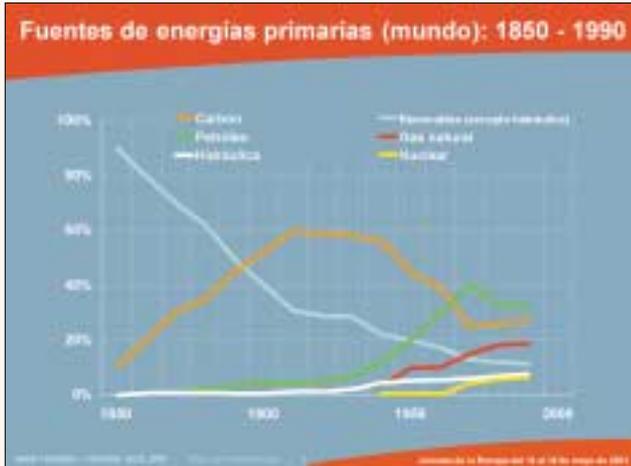
En lo que afecta al petróleo, pensamos que las condiciones relacionadas con la cuestión de las reservas comenzarán a manifestarse bastante rápidamente entre 2010 y 2020. En efecto, en este horizonte, será evidente para la mayoría de los observadores que los nuevos descubrimientos ya no podrán renovar los consumos y que el crecimiento de las reservas y las producciones se fundamente básicamente en dos fenómenos: el incremento de las reservas de los yacimientos convencionales ya descubiertos y la transformación creciente de recursos no convencionales en reservas convencionales (fundamentalmente los brutos ultrapesados y los betunes, para 500 a 1000 mil millones de barriles de nuevas reservas de aquí a 2050 y los *offshores* profundos y ultraprofundos para 100 a 200 mil millones de barriles). Esta toma de conciencia debería anticipar la rarefacción física mediante efectos de alzas de precios que limitarán los ni-

### Una visión de los balances energéticos 2000 - 2020 - 2050

	2000		2020		2050	
	Gtep	%	Gtep	%	Gtep	%
<small>Fuente: Review de l'Énergie, 50 años, 11<sup>e</sup> Sept. 03.</small>						
Petróleo	3.7	40	5.0	40	3.5	20
Gas	2.1	22	4.0	27	4.5	25
Carbón	2.2	24	3.0	20	4.5	25
<b>Conjunto de energías fósiles</b>	<b>8.0</b>	<b>86</b>	<b>12.0</b>	<b>87</b>	<b>12.5</b>	<b>70</b>
Renovables, entre los cuales los sectores eléctricos	0.7 (0.5)	7.5	1 (0.7)	6.5	1.5 (0.9)	8
Nuclear	0.6	6.5	1	6.5	4	22
<b>Total de todas las energías</b>	<b>9.3</b>	<b>100.0</b>	<b>14.0</b>	<b>100.0</b>	<b>18.0</b>	<b>100.0</b>

World Resources, November 2002, 2003

Journal de la Énergie del 14 al 18 de mayo de 2001



veles de producción: Pensamos que la producción mundial actual de 3,7 Gtep podría, en el mejor caso, aumentar un poco más del 30 % para alcanzar un máximo de 5 Gtep entre 2010 y 2020 antes de declinar bastante rápidamente hacia 4,5 Gtep en 2030. En 2050, esta producción de hidrocarburos líquidos debería alcanzar un nivel cercano al actual, es decir, unos 3,5 Gtep, a los que se pueden sumar cantidades relativamente marginales provenientes de la conversión en líquidos petroleros de gas natural o de gas de síntesis (obtenidos a partir de carbón, biomasa o desechos). El plan anterior parece coherente con lo que se sabe actualmente no sólo de las reservas probadas de petróleo sino de los recursos y de las reservas últimas.

En cuanto al gas natural, nuestros conocimientos más imprecisos del volumen en tierra de los "recursos últimos" hace que nuestras predicciones sean más inciertas. Sin embargo, también en este caso se planteará el

problema en materia de reservas cuando se tome conciencia de que los descubrimientos ya no compensan a los consumos. Tras una impresión de gran abundancia en materia de reservas que debería durar hasta 2010-2020, la intensidad de la toma de conciencia podría ser mayor aún que para el petróleo debido al menor margen en la reevaluación de las reservas de los yacimientos ya descubiertos. En efecto, recordemos que, de los dos factores subyacentes en estas revaluaciones, es decir la subestimación o la subdeclaración inicial y la mejora de las tasas de recuperación, sólo el primero interviene en la práctica para el gas. Esto no quiere decir que este juego no tenga importancia alguna: Por ejemplo, ha sido importante en el caso de Groninga cuyas "reservas iniciales" se han triplicado en 30 años. En cambio, ha sido prácticamente nulo para Frigg o para Lacq cuyas reservas reales (bien conocidas puesto que ambos yacimientos ya están agotados o casi

agotados) son, en general, idénticos a las estimaciones proporcionadas desde los primeros años de producción. La primera cuestión que es necesario plantearse es saber si Urengoi y los yacimientos de la península de Yamal o North Dome-South Pars se comportarán en materia de reservas como Groninga o como Frigg... Pensamos que, ya antes de 2010, la segunda hipótesis será la correcta y que las reestimaciones posteriores serán muy limitadas. La segunda cuestión que es necesario plantearse en materia de gas es saber si la exploración gasera nos reserva en los próximos veinte o treinta años el equivalente en el mundo de una decena de nuevas provincias del tipo de la de Bolivia... o una cincuentena. Creemos que será el primero de estos dos casos. Otro factor limitará el "máximo" de las producciones gaseras en el plano mundial, a saber la rigidez física de las cadenas gaseras y la importancia de las inversiones relacionadas con estas cadenas. En la prác-

tica, se no desarrollará nuevos grandes conductos ni nuevas fábricas de licuefacción para situaciones en las que estas infraestructuras no fueren utilizadas correctamente durante una treintena de años en promedio. Hacia

de aproximadamente de 25 a 30 Gtep y, según nuestra perspectiva más modesta, en particular debido a hipótesis demográficas menos elevadas (8 Ghab  $\pm$  2 contra 10  $\pm$  1)- de aproximadamente 18 Gtep (es decir, de

hemos evocado la rica problemática del secuestro del carbono: Trampas forestales de carbono, "descarbonización" de los hidrocarburos, inyección de gas carbónico en las capas acuíferas o en los profundos fondos marinos, centrales eléctricas de oxígeno para no diluir el gas carbónico mediante el nitrógeno del aire, y muchos otros temas relacionados. En efecto, estos temas, por interesantes que sean, nos han parecido un tanto secundarios en cuanto a la problemática de la mezcla energética en el horizonte 2050.

Tampoco hemos evocado la cuestión de la competencia entre generación eléctrica centralizada (grandes embalses, grandes centrales de carbón, gas o nucleares) y descentralizada (energías renovables, pilas de combustible, pequeñas cogeneraciones, microturbinas, etc. o incluso microcentrales nucleares). Esta cuestión tampoco nos parece ser determinante en cuanto a la mezcla energética en el horizonte 2050.

Este punto de vista puede sorprender, pero no se debe olvidar que las microturbinas, así como probablemente las pilas de combustible fijas, consumirán fundamentalmente gas natural. Igualmente, las pilas de combustible embarcadas (automóviles) serán probablemente pilas de hidrógeno; pero éste será a su vez producido muy probablemente a partir de hidrocarburos. Recordemos que, para producir hidrógeno, en la práctica será preciso producir masivamente gas carbónico. En efecto, la fuente más plausible de este hidrógeno será el reformado (u otra conversión química) de líquidos petroleros o derivados del petróleo, si esta conversión se realiza a bordo de vehículos, o de gases si la producción de hidrógeno se realiza antes de los vehículos, en estaciones de distribución, o mucho antes aún en centrales generadoras de hidrógeno en las que se podrá producirlo a partir de petróleo, gas, carbón o biomasa. Como el objetivo será probablemente "secuestrar" el gas carbónico (reinyección, etc.) para evitar devolverlo a la atmósfera, se ve

## Energías y desarrollo sostenible: los hidrocarburos y el nuclear, energías mucho más complementarias que rivales.

7

### Del buen uso de cada fuente de energía

- Los hidrocarburos líquidos son recursos limitados y más vale utilizarlos fundamentalmente donde sus características de alta densidad energética y de riqueza química sean valorizadas plenamente, es decir:
  - los transportes (terrestre, aéreo, marítimo);
  - como materia prima (petroquímica, química, betunes, solventes, etc.)
- Para los usos térmicos, incluso la producción de electricidad, la utilización de hidrocarburos líquidos no es una buena valorización (excepto en el caso de "fondos de barril", o en caso de consumidores alejados de las redes energéticas o de aquellos cuyas redes de aprovisionamiento sean defectuosas).
  - los hidrocarburos gaseosos son una mejor solución en ciertos casos, así como para corto y mediano plazo. Pero después de 2050, habrá muy probablemente problemas de abastecimiento
  - el sector nuclear es desde ahora la mejor solución en otros casos (países desarrollados con una buena cultura de seguridad) y deberá serlo de manera muy amplia en el horizonte de 2020 - 2050 (necesidad de pequeños reactores "fail safe").

Avance de la energía del 14 al 10 de mayo de 2001

2015-2025, se debería alcanzar el pico o más bien el nivel de máxima producción de gas, que podría durar entre 30 y 40 años, es decir hasta 2050-2060 antes de que se inicie la decadencia de la producción mundial de gas. Se podría retardar aún esta decadencia si la exploración de las franjas profundas de las cuencas sedimentarias presentara importantes sorpresas o si las evoluciones tecnológicas permitieran en este horizonte convertir los recursos de hidratos en reservas: ambas posibilidades parecen ofrecer una baja probabilidad.

Se puede estimar este nivel al doble o a un poco más del doble de las producciones mundiales actuales, es decir, a aproximadamente a 4,5 Gtep/año. Según estimaciones precedentes, el panorama de las producciones de energías fósiles en 2050 podría presentarse de la siguiente manera: carbón 4,5 Gtep, petróleo 3,5 Gtep y gas 4,5 Gtep, es decir, un total de energías fósiles de 12,5 Gtep. Frente a estos 12,5 Gtep, la demanda que se debe satisfacer sería (según los planes presentados clásicamente)

todas maneras el doble de los 9 Gtep actuales). Con esta hipótesis, el déficit que las energías no carbonadas deben completar sería aún considerable, de aproximadamente 5,5 Gtep.

Si, como hemos estimado, las energías renovables sólo pueden aportar una contribución de aproximadamente 1 a 1,5 Gtep, se ve que el déficit que se debe completar desde 2050 con las energías nucleares sería de aproximadamente 4 a 4,5 Gtep, es decir, mayor. Se pueden resumir todas estas conclusiones en el cuadro de síntesis de la página anterior.

### EPÍLOGO

Se han excluido de los temas tratados aquí muchos problemas importantes para la evolución de las industrias energéticas a corto o medio plazo.

Por ejemplo, no hemos hecho referencia alguna a las cuestiones de geopolítica, concentración geográfica de las reservas, fusiones y adquisiciones, ni de la diversificación de las actividades de las Sociedades petroleras, gaseras o eléctricas. Tampoco

entonces el interés de generar este hidrógeno "antes" de los vehículos y no a bordo de éstos.

Sólo un verdadero pánico relativo a las consecuencias del efecto invernadero (que se trate de efectos reales o supuestos) y a los costes muy elevados de secuestro del gas carbónico podrían justificar un recurso rápido al otro sector potencial de generación de hidrógeno, es decir, un recurso al sector nuclear. En este plan de catástrofe (por lo demás, muy improbable), estallaría la demanda de energía eléctrica de origen no fósil, por lo tanto fundamentalmente nuclear. Se lamentaría amargamente haber perdido veinte o treinta años de experiencia del ciclo de los supergeneradores.

Para concluir, quisiéramos insistir sobre dos puntos (a nuestro parecer fundamentales) en cuanto al futuro de las distintas energías.

El primer punto es el que se refiere a los contenidos de gas carbónico en la atmósfera durante los próximos decenios y las consecuencias potenciales en materia de cambios climáticos. Hemos reflejado gráficamente las consecuencias en materia de con-

menos de dos siglos de 280 a 360 ppm, continuará para alcanzar aproximadamente 500 ppm en el horizonte 2050 (es decir, de 450 a 550 ppm en 2050).

Pensamos que esto será en el futuro prácticamente inevitable, cualesquiera que sean las políticas que se implementaren en los próximos veinte años debido a la gran inercia de los sistemas energéticos (efectos de parque mayores, tanto en lo que concierne a los sistemas de consumo como a los sistemas de producción energéticos). Desconocemos ampliamente los efectos climáticos potenciales de estos contenidos de CO<sub>2</sub>, mientras no habían excedido 300 ppm durante los últimos 400.000 años, muy ricos en variaciones climáticas. Pese a los progresos de la modernización climática, se plantea una incógnita mayor pero, cualesquiera que sean las consecuencias, (menores, importantes o incluso catastróficas), deberemos adaptarnos.

El segundo punto que nos parece importante subrayar es el de una futura creciente complementariedad de las energías fósiles y de las energías

En efecto, los hidrocarburos líquidos tienen una triple vocación natural:

- Una vocación de materia prima (petroquímica, química, solventes, etc.)
- Una vocación mayor para la función de movilidad (terrestre, aérea, marítima) relacionada con su muy importante "compacidad energética"
- Una vocación para el aprovisionamiento de las necesidades energéticas fuera de las redes (fábricas aisladas, granjas, plantaciones, etc.) pero relativamente importantes, relacionada con el bajo coste de transporte de los hidrocarburos líquidos.

Para demandas menores, deberán imponerse las energías renovables y especialmente la solar fotovoltaica

En cuanto al nuclear, su vocación casi exclusiva hoy día y durante los veinte o treinta años siguientes es la producción de electricidad allí donde las necesidades sean importantes y estén lo suficientemente concentradas.

Si se proyecta hacia 2050, deberán aparecer nuevas complementariedades entre las energías fósiles y las nucleares. En efecto, se deberán siempre llevar más allá las tasas de recuperación de los yacimientos petrolíferos, en particular de los que contienen crudos pesados o ultrapesados, y tal vez incluso recurrir (como a principios del siglo XX a los esquistos bituminosos. Para realizar esto emitiendo un mínimo de CO<sub>2</sub>, se puede presagiar que será necesario recurrir a calorías "no fósiles" y que éstas serán (de una u otra manera) de origen nuclear. El mismo razonamiento debería aplicarse a los procedimientos "Gas to liquids" (GTL) cuyo autoconsumo energético en sus variantes actuales (35 a 45 % de autoconsumo) hará que su desarrollo sea no económico si se desarrollan condiciones que penalicen las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Aquí también el aporte de calorías nucleares (o directamente de hidrógeno de origen nuclear<sup>(\*)</sup>) debería ofrecer una solución elegante, que

**Energías y desarrollo sostenible: los hidrocarburos y el nuclear, energías mucho más complementarias que rivales.** 2

**Las complementariedades hacia 2050 y más allá**

- Para producir hidrocarburos difíciles de extraer de las rocas que los contienen, se necesitará mucha energía (vapor u otra inyectada en los yacimientos, tratamientos térmicos en superficie en caso de explotación tipo minera). Si se desea limitar la producción de CO<sub>2</sub>, estas calorías pueden ser de origen nuclear (¿reactores HTR?).
  - Nuevas mejoras de las tasas de recuperación en los grandes yacimientos petroleros clásicos y a tortón en los de crudo pesado o ultrapesado (Athabasca, Orinoco) gracias a las "calorías nucleares".
  - Posibilidades de producción económica de esquistos bituminosos o de hidratos de gas??
  - Posibilidad de mejora de los procedimientos GTL (gas to liquids) o de "licuefacción del carbón" utilizando el hidrógeno de fuente nuclear: éste sería el Fisher Tropsch ecológico.
- Por otra parte, el hidrógeno de origen nuclear podría estar disponible para las necesidades del refinado y de la petroquímica.

Journal de l'Énergie n° 19 et 18 du mardi en 2001

tenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de nuestra visión 2020-2050 de la mezcla energética mundial: el aumento de este contenido, que ha pasado en

nucleares. Esta complementariedad es desde ahora clara en lo que se refiere a los usos respectivos de estas dos familias de recursos energéticos.

*(\*) Existe ya un prototipo de reactor nuclear experimental HTR consagrado a la producción de hidrógeno: Este reactor de 30 MW térmicos se instaló en Japón en 1998; pero, tras atravesar una serie de dificultades, volvió a arrancar en 2000.*

asegure una larga perennidad a los hidrocarburos líquidos cualesquiera que sean los sectores de utilización finales: motores de combustión interna, turbinas, pilas de combustible... o incluso utilizaciones específicas de simple combustión.

Se debería desarrollar otra complementariedad entre hidrocarburos e hidrógeno de origen nuclear cuando el coste de éste último vuelva a ser competitivo con respecto al coste completo (es decir, que integre los elementos externos como los eventuales costes de emisión de CO<sub>2</sub>) del hi-

## Algunas paradojas sobre el hidrógeno y el desarrollo sostenible

1

### Hidrógeno y fundamentos económicos

#### 1. La producción de hidrógeno es y seguirá siendo cara, tanto hoy como mañana:

- Hoy y hasta 2030-2050, se le producirá a partir de energías fósiles, a un coste de aproximadamente 5 a 10 veces (por unidad de energía) el de las energías fósiles que sirven para producirlo.
- Mañana, aproximadamente en 2030, será producido gradualmente a partir de la energía nuclear, ya sea por electrólisis, ya sea por métodos térmicos directos de descomposición del agua.

#### 2. El transporte y el almacenamiento del hidrógeno son caros y seguirán siéndolo.

- Hoy y mañana, su transporte por conducto cuesta y costará 10 a 15 veces más caro por unidad de energía transportada que el de los hidrocarburos líquidos (las leyes de la termodinámica son lo que son).
- El coste de su almacenamiento (ya sea bajo presión, ya sea criogénico, ya sea en formas químicas, ya sea absorbido) puede disminuir, pero seguirá siendo más caro que el de los hidrocarburos líquidos.

Revista de la Energía del 14 al 18 de mayo de 2001

## Algunas paradojas sobre el hidrógeno y el desarrollo sostenible

2

### El hidrógeno y sus utilizaciones

#### 1. Para los usos caloríficos (calderas industriales, vapor, electricidad, calefacción, climatización, etc.)

- el hidrógeno es un "vector" menos interesante que la electricidad: el coste de la electricidad y el coste del gas natural son del mismo tipo en materia de logística / transporte, ya sea en cantidades masivas, ya sea en redes finales, mientras que el transporte y la distribución del hidrógeno son y seguirán siendo 3 a 4 veces más caros que los del gas natural.

#### 2. Para los usos de movilidad (transportes por carretera, aviación, transportes marítimos)

- La ventaja del hidrógeno radica en la ausencia de contaminación urbana (ya sea que se le utilice en motores de explosión, turbinas o pilas de combustible). En cambio, los costes elevados de logística y almacenamiento en los vehículos automóviles/aviones/barcos hacen que para los usos de movilidad, el hidrógeno conserve su desventaja de baja concentración energética volumétrica y de alto coste de almacenamiento.

#### 3. Para los usos de movilidad, la mejor manera de utilizar el hidrógeno es probablemente "carbonario" para hacer hidrocarburos de síntesis.

Revista de la Energía del 14 al 18 de mayo de 2001

mejor manera de "compactar" energéticamente el hidrógeno sería añadirle carbono, volviendo a crear sintéticamente hidrocarburos.

¡Esta sería una versión ecológica del procedimiento Fisher Tropsch!

Más allá de estas observaciones que pueden parecer un poco paradójicas (y que son contrarias al pensamiento dominante del tiempo actual) subrayaremos, para terminar, que incluso si el efecto invernadero no engendrase limitaciones importantes en cuanto a nuestras fuentes de energía en el horizonte 2050 (lo que hemos supuesto al aceptar un crecimiento relativamente

drógeno producido con base en energías fósiles. Esta complementariedad sería el suministro de hidrógeno a los grandes centros de refinado y petroquímica, tanto para las necesidades de "upgrading" de crudos pesados o ultrapesados como para las necesidades de alineación y desulfuración avanzada de los diferentes cortes petroleros o petroquímicos.

Sin embargo, incluso si gracias al nuclear se puede esperar disponer, hacia 2050, de hidrógeno en cantidades masivas y a un coste razonable, este hidrógeno debería seguir siendo un vector energético "malo" por las razones de fondo ya expresadas...

Se puede entonces soñar con otras complementariedades entre una industria nuclear fuente de hidrógeno y la industria petrolera: En efecto, la

fuerte del carbón para poder "cerrar los balances") se ve aparecer más allá de 2020 un verdadero cambio en los grandes equilibrios energéticos. Tras una fase de fuerte crecimiento de los hidrocarburos (petróleo y gas) hasta 2020, el sector nuclear debe, desde 2030, tomar el relevo de la satisfacción del aumento de nuestras necesidades en materia de energía. Más vale saberlo y prepararse... ■